A. CAMPA

TECHNOLOGIE

professionnelle générale pour les

MÉCANICIENS

TOME II

FOUCHER - PARIS

A. CAMPA
Ingén eur A. et M. et E. S. E.
Inspecteur général de l'Enseignement technique

TECHNOLOGIE
professionnelle générale pour les
MÉCANICIENS
TOME II

CLASSE DE I^re^

Préparation aux baccalauréats E et F_1

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli, Paris

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires. (Réf. Loi du 11 mars 1957.)

© Les Éditions FOUCHER, Paris, 1971.

AVANT-PROPOS

La technologie professionnelle générale est une discipline essentielle pour les élèves de nos Écoles techniques. Elle rend possible et facile l'explication des travaux d'atelier et permet à la technologie de spécialité de s'orienter vers l'étude raisonnée des méthodes d'usinage.

Le livre de technologie générale apporte au maître une aide précieuse, car il le dispense de tout dire en classe. Il n'a pas la prétention de lui tracer, dans le détail, le canevas de sa leçon. L'auteur de cet ouvrage est trop respectueux de la personnalité des professeurs pour oser leur imposer, jusque dans le détail de leur métier, ses propres conceptions pédagogiques. Il sait que chaque maître est persuadé qu'il importe avant tout, en prenant pour thème l'étude des techniques de production, de donner à nos élèves toutes les qualités intellectuelles indispensables à l'accomplissement de leur futur métier.

L'homme est de plus en plus engagé dans l'Entreprise moderne car, à tous les échelons de la hiérarchie, elle lui réserve, dans un champ d'activité parfaitement délimité, l'occasion de s'informer par l'observation, de faire preuve de jugement en plaçant les faits extérieurs à l'intérieur du problème à résoudre, de compléter les actes réflexes par des décisions conscientes qui font surtout appel à l'imagination, de conduire l'action et de contrôler sa propre activité ainsi que celle de tous ceux qui sont chargés de l'exécution des décisions prises.

L'homme cesse, de plus en plus, d'être employé dans le cycle de la production pour accomplir un travail pouvant être exécuté par une machine; il reste indispensable à l'industrie parce que seul, il est capable d'ajouter à l'observation, la critique et l'explication, il est susceptible d'analyser les phénomènes pour mettre en évidence les fonctions assurées et apte à découvrir des solutions nouvelles, grâce à ses possibilités de réaliser des synthèses.

Appelé à la tête d'une équipe de travail, il remplit à la fois les fonctions d'organisateur *des activités de ses collaborateurs,* d'éducateur *pour les instruire et obtenir d'eux une action raisonnée,* d'animateur *afin d'introduire, dans l'acte de travail, volontariat et enthousiasme.*

Pour préparer l'adolescent à la vie, il importe que l'École s'efforce de le rendre capable d'acquérir seul, lorsqu'il en aura besoin, les connaissances indispensables à l'accomplissement de sa tâche. Elle doit obtenir du jeune une prise de conscience des valeurs spirituelles et développer en lui des mécanismes intellectuels: aptitude à l'observation, à l'analyse, à la synthèse, à l'imagination, à la recherche des analogies et des généralisations, développement de la mémoire et sûreté du jugement.

Les disciplines techniques et plus particulièrement la technologie, correctement enseignées, ont autant de vertus que les disciplines traditionnelles.

L'enseignement de la technologie ne peut s'accommoder des méthodes dogmatiques qui conduisent à l'indifférence intellectuelle de l'élève pour la matière étudiée et pour l'action pédagogique du maître. Il doit, au contraire, être fondé sur les règles bien connues : « de l'enfant à l'adulte », « du connu à l'inconnu », « du concret à l'abstrait ». La description doit s'effacer devant l'analyse fonctionnelle qui conduit à découvrir les démarches intellectuelles du créateur et ouvre des horizons nouveaux dans le domaine de l'invention.

A la classe passive doivent être substituées la classe vivante, qui assure au maître la collaboration intellectuelle des élèves, et la classe active, qui fait appel à leurs intérêts spontanés.

Ainsi apparaît la nécessité d'une expérimentation faite en classe par le maître, ou à l'atelier par les élèves, non seulement pour permettre l'effort intellectuel qui conduira du concret vers l'abstrait, mais surtout pour faire prendre conscience au jeune de la complexité du réel technique et l'habituer à une certaine audace professionnelle.

L'ouvrage de technologie que nous avons écrit pour les élèves des classes de seconde des Collèges techniques et des E. N. P., et qui est conforme aux programmes officiels, fait souvent mention de matériel expérimental à utiliser.

Quelques leçons, notamment celles relatives à l'outil de coupe, sont impossibles à faire sans matériel expérimental ; elles peuvent être rapidement comprises si elles sont préparées par une étude graphique dirigée par le professeur de dessin, réalisées avec du matériel abondant et bien adapté, complétées par des exercices à l'atelier sur machines à affûter.

Le développement important donné à l'étude théorique des structures métalliques et des diagrammes d'équilibre des alliages fer-carbone doit permettre aux élèves de tirer un profit maximum de leur stage à l'atelier des traitements thermiques.

Pour être en accord avec la norme FD. X. 02. 005 de mai 1953, nous avons adopté les unités du système M. K. S. A. et remplacé notamment le kilogramme-force par le newton.

Les contraintes ou résistances à la rupture ont été exprimées en newtons par millimètre carré et non en mégapascals, afin de rendre plus facile, dans l'esprit du lecteur, la conversion en kgf/mm².

Nous remercions les professeurs et les élèves qui nous ont encouragé à rédiger cet ouvrage, et plus particulièrement notre ancien élève M. Vinckel, professeur de Collège technique, qui a, au cours de la Semaine pédagogique de Cachan en 1957, présenté une étude remarquable de l'outil de coupe et de son affûtage. Nous exprimons également notre gratitude à M. Boyer, ingénieur à la Régie nationale des usines Renault, qui a bien voulu relire le chapitre consacré à l'étude des traitements thermiques, et à M. Arquès, directeur des études à l'École supérieure de commerce de Reims et professeur de sciences à la section de techniciens en traitements thermiques et métallographie du Collège national technique de Reims, qui nous a aidé à mettre au point les leçons relatives à la protection des surfaces métalliques.

Nous espérons que cet ouvrage trouvera un accueil favorable auprès des collègues chargés de l'enseignement de la Technologie, et qu'il rendra service aux élèves qui l'utiliseront, en leur apportant une documentation technique abondante.

A. CAMPA.

ÉTUDE DES PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION

TABLEAU DES PRINCIPALES UNITÉS

PRINCIPALES GRANDEURS	SYSTÈME M K S A	SYSTÈME M Kp S	RELATIONS ENTRE LES UNITÉS
	Unités fondamentales *Longueur* : 1 mètre *Masse* : 1 kilogramme *Temps* : 1 seconde *Intensité électrique* : 1 ampère	**Unités fondamentales** *Longueur* : 1 mètre *Force* : 1 kilogramme-force *Temps* : 1 seconde	
Masse	1 kilogramme : 1 kg	1 unité de masse m kp s	$1\ \text{kg} = \frac{1\ \text{um m kp s}}{9{,}8}$
Force	1 newton : 1 N	1 kilogramme-force : 1 kgf	1 kgf = 9,8 N $1\ \text{N} \simeq \frac{1\ \text{kgf}}{10}$
Pression	1 pascal : 1 P $1\ \text{P} = \frac{1\ \text{N}}{1\ \text{m}^2}$ 1 mégapascal : 1 MP	1 kilogramme-force par m^2 : 1 kgf /m^2 1 kilogramme-force par cm^2 : 1 kgf /cm^2	1 kgf/$\text{m}^2 \simeq$ 10 P 1 MP = 10^6 P 1 MP = 1 N/mm^2 1 hpz = 1 hectopièze 1 hpz = 1 kgf/cm^2
Contrainte ou résistance	1 newton par mm^2 : 1N /mm^2	1 kilogramme-force par mm^2 : 1 kgf /mm^2	1 kgf/$\text{mm}^2 \simeq$ 10 N/mm^2
Travail	1 joule : 1 J 1 kilojoule : 1kJ = 10^3J	1 kilogrammètre : 1kgm	1 kgm = 9,8 J $\simeq$ 10 J 1 kJ = 102 kgm
Puissance	1 watt : 1W 1 kilowatt : 1 kW = 10^3W	1 kilogrammètre par seconde : 1 kgm/s 1 cheval-vapeur : 1 ch	1 kgm/s = 9,8 W 1 ch = 75 kgm/s 1 ch = 736 W

Propriétés générales
des matériaux utilisés en construction mécanique ou électrique

GÉNÉRALITÉS

Les matériaux utilisés en construction mécanique ou électrique comprennent :

1° Les métaux et leurs alliages :

Métaux : fer, cuivre, étain, plomb, zinc, etc.

Alliages obtenus en mélangeant par fusion plusieurs corps simples.

EXEMPLES. — *Bronze* = cuivre + étain. *Laiton* = cuivre + zinc. *Acier au carbone* = fer + carbone. *Acier au nickel* = fer + carbone + nickel.

2° Les bois :

bois durs ; bois tendres.

3° Les matériaux divers :

caoutchouc, coton, cuir, amiante, bakélite, ébonite, etc.

La connaissance des propriétés de ces matériaux est nécessaire à tous ceux qui participent à la conception et à l'exécution des pièces utilisées pour les constructions.

PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

Elles peuvent se classer en deux catégories :

1° **Celles qui ont permis l'élaboration des pièces :**

a) Par *fusion* : fonderie.

b) Par *déformations à chaud* : forge.

c) Par *déformations à froid* : chaudronnerie.

2° **Celles qui justifient l'emploi des différents matériaux dans les constructions.**

A. — Propriétés correspondant aux différents modes d'élaboration des pièces

1° Propriétés permettant l'obtention des pièces par fusion à la fonderie.

a) *Fusibilité.*

C'est la propriété que possèdent certains corps de passer de l'état solide à l'état liquide sous l'action de la chaleur. Elle est caractérisée par la température de fusion. Le corps sera d'autant plus fusible que sa température de fusion sera basse.

Principales températures de fusion à retenir :

Fer :	1 530°	*Aluminium* :	650°
Aciers :	1 300 à 1 500°	*Zinc* :	420°
Fontes :	1 150 à 1 300°	*Plomb* :	330°
Cuivre :	1 080°	*Étain* :	235°

La *température de fusion* joue un rôle très important en fonderie. L'emploi de la *fonte* en construction mécanique s'explique en partie parce que ce métal, fondant à plus basse température, est plus facile à couler que l'*acier.*

Le *moulage sous pression en coquille métallique* utilise des métaux fondant à température relativement basse (alliages d'aluminium).

b) *Fluidité.*

Les métaux à l'état liquide occupent plus ou moins facilement la *forme* des moules dans lesquels ils sont coulés ; ils sont plus ou moins *fluides.* Avec un métal très fluide, on pourra donc couler des pièces présentant des détails nombreux et minutieux.

En général, *plus la température d'un métal augmente, plus sa fluidité devient grande.* Comme les températures élevées sont difficiles à obtenir, on cherche à réaliser, en fonderie, des *alliages* pour lesquels le degré de fluidité nécessaire est obtenu à la plus basse température.

Ainsi, le *phosphore* augmentant la fluidité des fontes, on coule des pièces minces avec des fontes riches en ce corps.

2° Propriétés permettant l'obtention des pièces par déformations à chaud : forgeage ou laminage.

a) *Malléabilité à chaud.*

La fusion de la *glace* est dite *brusque* parce que ce corps, sous l'action de la chaleur, passe directement de l'état solide à l'état liquide.

La plupart des *métaux*, au contraire, lorsqu'ils sont chauffés, passent, avant de fondre, par un *état intermédiaire pâteux*. Ils pourront donc, à chaud, se déformer sous l'action de chocs ou de pressions. Ils sont dits *malléables à chaud*.

C'est cette propriété qui est utilisée pour le travail des métaux et, en particulier, des aciers par *forgeage* ou par *laminage*.

b) *Soudabilité.*

C'est la propriété qui permet de *lier* entre eux deux morceaux d'un même métal sous l'*action de la chaleur*, combinée quelquefois avec un traitement mécanique, *choc* ou *pression*.

Suivant le mode d'exécution du soudage, les conditions de soudabilité peuvent changer :

a) **Soudage à la forge ou à chaude portée.** — Il est particulier à certains *aciers* (aciers extra-doux, aciers durs corroyés).

Les pièces portées à haute température (blanc soudant), inférieure cependant à la température de fusion, sont placées l'*une sur l'autre* et martelées violemment, ou l'*une au bout de l'autre* et serrées énergiquement.

b) **Soudage par fusion du métal** : *soudage autogène.* — La liaison des pièces est obtenue par fusion des parties en contact, la chaleur nécessaire étant fournie par la combustion de l'*acétylène* ou par un *arc électrique*.

Il y a donc lieu de spécifier, lorsqu'on veut indiquer la soudabilité d'un métal, de quel genre de soudage il s'agit.

Ainsi, l'*acier extra-doux* peut à la fois se souder à la forge, au chalumeau oxy-acétylénique et à l'arc ; l'*aluminium* n'est pratiquement pas soudable à la forge et à l'arc, mais peut très bien se souder au chalumeau.

3° Propriétés permettant l'obtention des pièces par déformations à froid : chaudronnerie, étirage, emboutissage.

a) *Malléabilité à froid.*

C'est la propriété que possède un corps de se déformer facilement à froid sous l'action de *chocs* ou de *pressions*. La malléabilité sera d'autant plus grande que les efforts nécessaires à la déformation seront plus faibles.

Si leur malléabilité à froid est très grande, les corps sont dits *plastiques.*

On ne peut *chaudronner, emboutir* ou *laminer* que des métaux *malléables à froid.* Voici, cités par ordre croissant de malléabilité à froid, les métaux les plus utilisés : l'*acier doux,* l'*acier extra-doux,* le *cuivre,* l'*étain,* l'*aluminium,* le *plomb.* La *trempe* et l'*écrouissage* résultant d'un martelage intensif diminuent la malléabilité. Le *recuit* redonne à un métal écroui ses propriétés premières.

b) *Ductilité.*

C'est la propriété qui permet à un métal d'être *étiré* ou *tréfilé.* Le métal en barre, soumis à un effort de traction, passe dans le trou d'une filière ; il subit ainsi une réduction de section uniforme (*fig.* 1).

Pour que cette opération puisse être réalisée, il est nécessaire que le métal soit à la fois *assez plastique* et *assez résistant* pour pouvoir supporter l'effort de traction sans se rompre.

Les métaux plastiques, dont la résistance est insuffisante, ne peuvent être étirés. Ils ne sont donc pas ductiles, mais ils peuvent être *filés* à la presse (*fig.* 2).

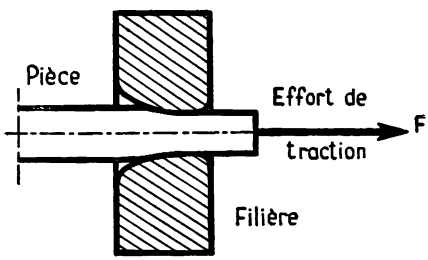


Fig. 1. — Schéma de principe d'une filière d'étirage.

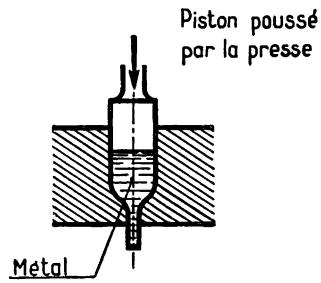


Fig. 2. — Schéma de principe d'une opération de filage à la presse.

B. — Propriétés qui justifient l'emploi des différents matériaux dans les constructions

1° Masse spécifique et densité.

La *masse spécifique* d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. L'unité de volume pratiquement choisie est le *décimètre cube* ; la masse spécifique s'exprime en *kilogrammes par dm*^{3}. C'est donc un nombre concret.

Exemple. — La masse spécifique de l'acier est de 7,8 *kg/dm*^{3}.

La *densité* est le rapport de la masse d'un certain volume de ce corps à la masse d'un égal volume d'eau.

$$\textit{densité} = \frac{\text{masse d'un volume V d'un corps}}{\text{masse du même volume V d'eau}}.$$

La densité est un nombre abstrait (sans unité). Puisqu'on a pris pour unité de masse le *kilogramme*, masse de 1 dm^3 d'eau, la densité et la masse spécifique s'expriment par le même nombre.

Densités à retenir :

Plomb :	11,4	*Fonte-Étain-Zinc* :	7,2
Cuivre et Bronze :	8,9	*Aluminium* :	2,7
Fer et Aciers :	7,8	*Magnésium* :	1,7

La notion de densité est très souvent à considérer en construction mécanique pour la détermination de la masse des organes.

Les *corps à forte densité* (plomb) sont, par exemple, utilisés pour exécuter des contrepoids d'encombrement minimum.

Les *alliages légers* sont employés en construction aéronautique, automobile, et, d'une façon générale, dans la fabrication des organes en mouvement (*diminution du poids mort*).

2° Conductibilité thermique.

C'est la propriété que possèdent certains corps de *transmettre* plus ou moins bien la chaleur.

Tous les métaux sont, en général, *bons conducteurs* de la chaleur. Citons, par ordre décroissant de conductibilité : argent, cuivre, aluminium, laiton, zinc, étain, acier et plomb.

Cette propriété justifie le choix de métaux très bons conducteurs pour l'exécution de pièces devant transmettre rapidement la chaleur : culasses de moteurs en aluminium, serpentins de chaudières ou de chauffe-eau en cuivre.

Certains corps sont *mauvais conducteurs* de la chaleur : citons par ordre décroissant de conductibilité : la pierre, le verre, la brique, le caoutchouc, le bois, le papier, le liège.

Ces matériaux sont utilisés comme *calorifuges* pour éviter les déperditions de chaleur ou pour la construction des maisons d'habitation.

3° Conductibilité électrique.

C'est la propriété que possèdent certains corps d'*opposer* une résistance plus ou moins grande au passage du courant électrique.

Les corps qui permettent à l'électricité de les traverser sont appelés **conducteurs**. Les *métaux* sont conducteurs de l'électricité. Certains, comme le cuivre et ses alliages, l'aluminium, la conduisent très bien et sont employés pour la fabrication de lignes électriques et d'appareillages. D'autres, comme les alliages chrome-nickel, ou fer-nickel, la conduisant très mal, servent à la construction de résistances électriques : appareils de chauffage, rhéostats.

Enfin, les corps qui ne se laissent pas traverser par l'électricité, sont appelés **isolants** : caoutchouc, bois sec, bakélite, ébonite, etc.

4° Dilatabilité.

Sous l'action de la chaleur, les dimensions des corps *augmentent.*

Cette propriété est souvent utilisée pour permettre des *emmanchements forcés* : frettage à chaud des volants, poulies, montage des roulements à billes, chemisage des moteurs d'automobile.

La pièce intérieure est fabriquée à un diamètre supérieur à celui de la pièce extérieure. Le chauffage de la pièce extérieure seule, ou le refroidissement à basse température de la pièce intérieure, permettra un emmanchement facile. Quand l'équilibre de température sera obtenu, il y aura serrage.

EXEMPLES. — *Montage d'un roulement* : celui-ci est chauffé dans l'huile à 100° ; l'arbre est laissé à la température ordinaire.

Chemisage d'un moteur : la chemise est refroidie dans de l'azote liquide à — 195° ; le bloc cylindre est laissé à la température ordinaire.

Il faut tenir compte de la dilatation ou de la contraction possible des pièces sous l'action des variations de la température ambiante (*ponts métalliques*, dont une extrémité est fixe, l'autre pouvant se déplacer sur des galets).

5° Ténacité.

C'est la résistance qu'offrent les matériaux aux *efforts dont l'application est progressive :* traction, compression, cisaillement, flexion, torsion.

a) *Traction.*

Considérons une pièce cylindrique ou prismatique ; si elle est soumise à l'action de deux forces égales, opposées, dirigées suivant son axe et qui tendent à l'allonger, on dit qu'elle travaille *à la traction* ou *à l'extension* (*fig.* 3).

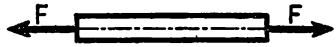


Fig. 3. — Pièce travaillant à la traction.

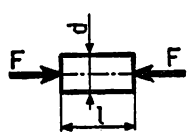


Fig. 4. — Pièce travaillant à la compression.

b) *Compression.*

La pièce travaillera à la compression simple, si elle est courte ($l \leqslant 5d$) et soumise à l'action de deux forces égales, directement opposées, dirigées suivant son axe, et qui tendent à la raccourcir (*fig.* 4).

c) *Cisaillement.*

Il y aura cisaillement si le cylindre, pris entre deux pièces A et B glissant l'une sur l'autre, tend à être rompu suivant une section normale (*fig.* 5).

d) *Torsion.*

La pièce est fixée à une extrémité (emmanchement dur, clavetage). A l'autre bout s'exerce un couple (forces F et F égales, parallèles, et de sens contraires). Les fibres du métal tendent à prendre la forme d'une hélice. On dit que la pièce travaille *à la torsion* (*fig.* 6).

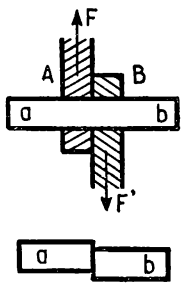


Fig. 5. — Pièce travaillant au cisaillement.

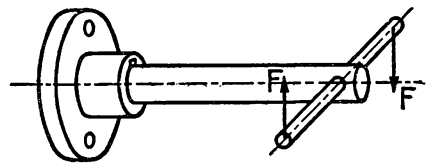


Fig. 6. — Pièce travaillant à la torsion.

e) *Flexion.*

La pièce est encastrée à l'une de ses extrémités dans un support ou bien elle repose par ses extrémités sur deux appuis. Elle est soumise à l'action d'une force F située dans un plan passant par son axe et perpendiculaire à cet axe. La pièce qui tend à se courber travaille *à la flexion* (*fig.* 7).

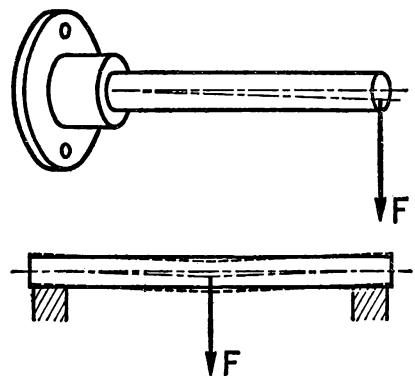


Fig. 7. — Pièces travaillant à la flexion.

Des cas plus complexes se présentent généralement ; il peut y avoir *traction* et *flexion, compression* et *flexion, traction* et *torsion,* ou encore à la fois *traction, cisaillement, torsion* et *flexion.*

6° Élasticité.

L'élasticité est la propriété que possèdent les corps de *se déformer* sous l'action d'un effort et de revenir exactement à leur forme initiale lorsque l'effort a cessé. On dit que la déformation est *élastique.* Cette propriété est recherchée pour le choix des métaux utilisés à la fabrication des ressorts. Le plomb, l'étain, l'aluminium recuit, l'acier doux recuit sont peu élastiques. Le bois, l'acier dur trempé, les aciers mangano-siliceux le sont beaucoup plus.

7° Dureté.

La dureté est la *résistance à la pénétration* d'un corps par un autre. Elle ne peut se mesurer que par comparaison des matériaux entre eux.

Lorsqu'un corps est susceptible d'en *rayer* un autre, on dit qu'il est plus dur que celui qui a été rayé.

On verra, dans l'étude des essais de dureté, comment on peut la mesurer.

Le corps le plus dur est le *diamant* qui raye tous les autres.

La trempe augmente la dureté des aciers, tandis que le recuit la diminue. L'écrouissage durcit également la surface des pièces.

La dureté est recherchée pour les *outils de coupe*, pour ceux qui travaillent par *chocs*, et pour les *pièces de frottement* (diminution de l'usure).

8° Résilience ou non fragilité.

La résilience est la *résistance* opposée par les matériaux aux *efforts brusques* ou aux *chocs*.

Elle se mesure par l'*énergie* nécessaire pour provoquer la rupture des pièces.

Un métal fragile a une faible résilience. La *trempe* et l'*écrouissage* diminuent la résilience des métaux. Le *recuit*, au contraire, les rend moins fragiles.

Cette caractéristique est à considérer lorsqu'on doit choisir la qualité du métal constituant des pièces appelées à subir des efforts violents ou des chocs : outils d'étau-limeur ou de raboteuse, matrices pour pilons, bielles et vilebrequins de moteurs, etc.

Des essais particuliers permettent de définir avec précision chacune des propriétés qui viennent d'être étudiées. Ils ont pour but de déterminer des nombres appelés **caractéristiques mécaniques des matériaux.**

◇

Essais des matériaux

GÉNÉRALITÉS

A. — But des essais

Les organes qui constituent les machines, les constructions civiles, les ouvrages d'art, doivent résister aux efforts auxquels ils sont soumis sans risque de rupture, de détérioration ou d'usure prématurée.

Les dimensions des pièces ne peuvent être déterminées que si l'on connaît avec précision les propriétés des matériaux employés.

Les différentes propriétés d'un matériau sont définies par des nombres appelés *caractéristiques.*

Les essais ont pour objet la détermination de ces caractéristiques. Ils sont exécutés dans les laboratoires des usines et nécessitent l'utilisation de machines et d'outillage spéciaux.

On ne peut évidemment songer à essayer la totalité d'une livraison d'un matériau nécessaire à une construction. Il serait trop onéreux et pratiquement inutile de faire subir des essais à toutes les barres de profilés qui entrent, par exemple, dans la construction d'un pont métallique. On se contente de prélever, sur un certain nombre de barres prises au hasard dans le lot livré, des éprouvettes, destinées aux essais qui serviront à déterminer les caractéristiques nécessaires au bureau d'études.

B. — Classification des essais

Les essais, extrêmement nombreux, comprennent :

1° Les essais statiques.

Dans tous ces essais, les éprouvettes sont soumises à des efforts croissant progressivement et lentement à partir de zéro jusqu'à un maximum correspondant à la rupture.

Les principaux sont les essais de traction, compression, cisaillement, torsion, flexion.

2° Les essais dynamiques.

La plupart des éléments de construction, en particulier les organes de machines en mouvement, sont généralement soumis à des charges extrêmement variables pouvant être considérées comme des chocs lorsque leur variation est importante

et qu'elle a lieu dans un temps court. Les essais dynamiques ont pour effet de placer l'éprouvette à essayer dans des circonstances analogues, ou plus défavorables, que celles subies par l'organe de machine lors de son emploi. Les principaux sont : les essais au **choc** ou essais de **résilience** et les essais d'**endurance** ou essais de **fatigue.**

3° Les essais complémentaires.

Ce sont les essais de dureté (d'une importance considérable dans la pratique) et les essais d'usure.

4° Les essais de travail.

Ils correspondent aux diverses applications industrielles et diffèrent suivant la forme et la destination des métaux à contrôler. Ce sont :

les essais de pliage à froid,
— de pliage à chaud,
— de rabattement et de perçage,
— d'emboutissage,
— d'aplatissement,
— de tir.

5° Les essais chimiques.

Ils ont pour but de déterminer exactement la composition qualitative et quantitative des produits employés ou élaborés.

6° Les essais de texture.

Micrographie, macrographie.

ÉTUDE DES PRINCIPAUX ESSAIS

Cette étude ne portera que sur les essais fondamentaux qui définissent les caractéristiques essentielles des matériaux et plus particulièrement des métaux.

Essai statique : essai de traction.

Essai dynamique : essai au choc, essai de fatigue.

Essai complémentaire : essai de dureté.

Nous ne décrirons pas les **essais de travail** très particuliers, dont certains ont fait l'objet de normes : *essai de pliage* NF A 03-107, *essai d'emboutissage* NF 03-601.

Les **essais de texture** sont décrits à l'occasion de l'étude des alliages fer-carbone.

A. — Essais de traction

1° Définition.

Une barre est sollicitée *à la traction simple* lorsque la résultante des efforts auxquels elle est soumise tend à l'allonger et qu'elle est dirigée suivant son axe.

2° Essais de traction.

a) *Éprouvettes.*

1° **Métaux en barres.** — Les éprouvettes, de forme générale cylindrique, sont soigneusement polies et calibrées (rectifiées pour les aciers). Le corps C, de section constante S, est terminé par 2 têtes A et B raccordées au corps par des congés de rayon *r*. Au milieu du corps, sur 1 ou 2 cm de longueur, on diminue le diamètre de 0,1 mm pour localiser la rupture (*fig.* 1 *a*).

Sur le corps, en D et E, on marque deux légers coups de pointeau dont la distance L définit la *longueur initiale* de l'éprouvette.

Les dimensions dépendent des pièces qui les ont fournies ainsi que de la puissance de la machine de traction. Toutefois, pour que les résultats puissent être comparables, les dimensions principales (distance L *mm* et section S mm^2) doivent satisfaire à la relation de similitude suivante :

$$L = \sqrt{66{,}67 \times S.}$$

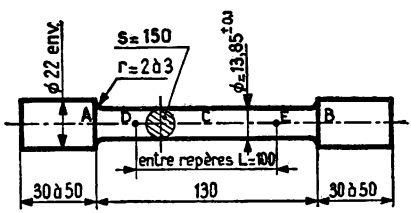


Fig. 1 *a.* — Éprouvette cylindrique pour essai de traction.

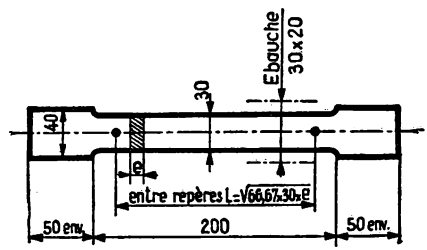


Fig. 1 *b.* — Éprouvette plate pour essai de traction.

2° **Métaux en feuilles** (tôles, barres plates ou profilées jusqu'à 3 mm d'épaisseur). — Les éprouvettes sont plates, à section rectangulaire (*fig.* 1 *b*). Elles peuvent être découpées à la scie, à la cisaille, à la mortaiseuse ou au chalumeau, à condition, toutefois, que les cotes de l'ébauche soient supérieures de 20 mm aux cotes définitives. Ces cotes finales sont ensuite atteintes à l'étau-limeur, à la raboteuse ou à la fraiseuse.

L'épaisseur des éprouvettes est celle des barres sur lesquelles elles ont été prélevées. La largeur varie de 30 à 20 mm suivant l'épaisseur.

La longueur entre repères se détermine à l'aide de la relation de similitude $L = \sqrt{66{,}67 \times S}$. On arrondit afin d'obtenir comme longueur un nombre terminé par 0 ou 5.

3° **Métaux en fil.** — L'éprouvette est constituée par le fil lui-même. Sa longueur doit être au moins égale à 100 mm. Les conditions de l'essai doivent être spécifiées avec précision.

b) *Machines d'essais de traction (fig. 2).*

Les éprouvettes sont solidement maintenues par leurs têtes entre des mâchoires de la machine. Ces mâchoires, en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette. Des appareils, adaptés à la machine, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge, et l'allongement correspondant de l'éprouvette.

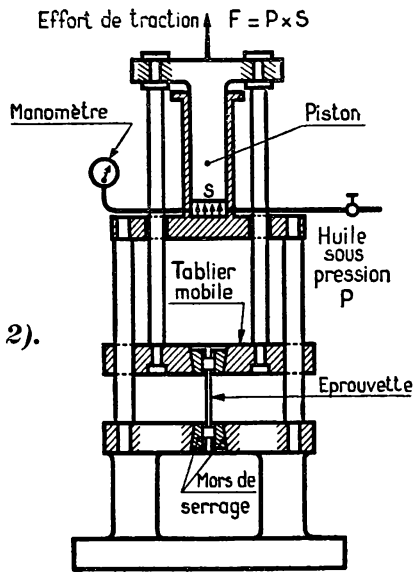


Fig. 2. — Schéma de la machine d'essai de traction.

c) *Diagramme de l'essai de traction.*

Presque toutes les machines de traction permettent l'enregistrement graphique de l'allongement de l'éprouvette en fonction de la charge.

La courbe relevée au cours de l'essai de traction est donnée sur la *figure* 3.

Sur l'axe horizontal O*x* (*abscisses*) sont portés les allongements en *mm* ; sur l'axe vertical O*y* (*ordonnées*) sont portées les charges en *newtons* ou *kgf*.

1° La partie OB correspond à une période de déformations où les *allongements sont proportionnels aux charges* ; si l'effort de traction devient 2, 3,... *n* fois plus grand, l'allongement devient également 2, 3,... *n* fois plus grand.

Cette période correspond aux *déformations élastiques*, car si l'on cesse de tirer sur l'éprouvette, celle-ci reprend sa longueur primitive.

2° Le point B correspond à la fin de la proportionnalité des allongements aux charges. Pratiquement, ce point marque aussi la fin de l'élasticité. La charge correspondante F_e est la *charge de limite élastique.*

3° La partie de courbe BCDK correspond à une période de grands allongements qui croissent plus vite que les charges. Pour un effort F_2, l'allongement est a_2 ; si l'on supprime la charge, l'éprouvette conserve un allongement a'_2 ; la *déformation est permanente.*

4° Enfin, pour un effort F_r la rupture a lieu après l'étranglement de l'éprouvette dans sa partie médiane (*striction*).

En juxtaposant les morceaux de l'éprouvette, on mesure l'*allongement total de rupture* a_r.

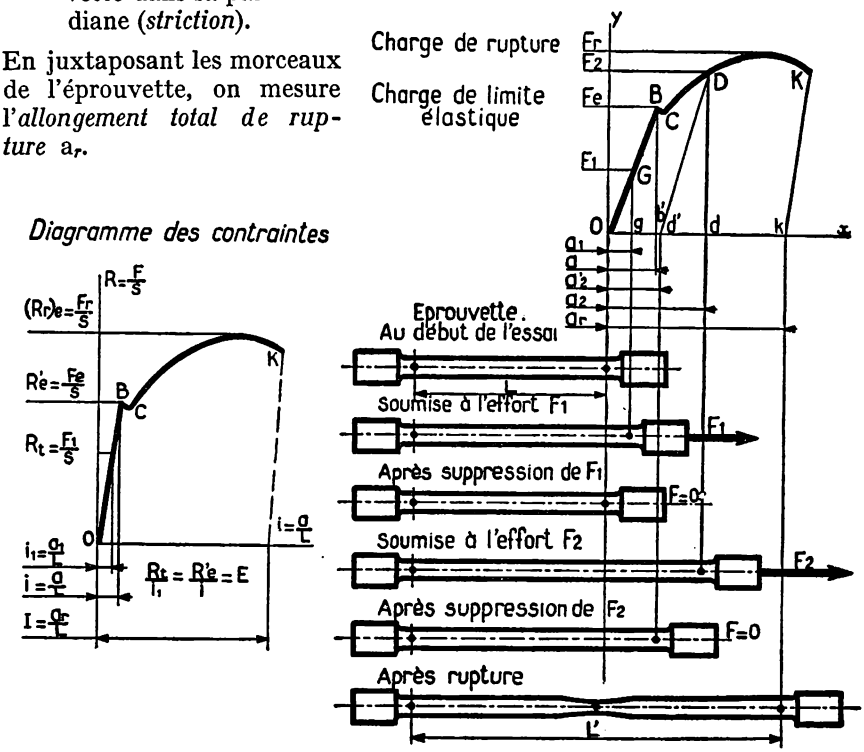


Fig. 3. — Diagramme d'essai de traction.

d) *Caractéristiques mécaniques.*

1° Contrainte de limite élastique R'_e.

Système M. K. S. A. :

C'est le quotient de l'effort de limite élastique F_e, exprimé en *newtons*, par la section initiale de l'éprouvette en *millimètres carrés* :

$$R'_e = \frac{F_e \text{ en } N}{S \text{ en } mm^2}.$$

Elle s'exprime en *newtons par millimètre carré* (N/mm^2).

Système M. Kp. S. : $R'_e = \frac{F_e \text{ en } kgf}{S \text{ en } mm^2}$.

Elle s'exprime en kgf/mm^2.

2° **Résistance à la rupture à l'extension** $(R_r)_e$.

Système M. K. S. A. :

C'est le quotient de l'effort de rupture F_r exprimé en *newtons*, par la section initiale de l'éprouvette en *millimètres carrés* :

$$(R_r)_e = \frac{F_r \text{ en } N}{S \text{ en } mm^2}.$$

Elle s'exprime en *newtons par millimètre carré* (N/mm^2).

Le nombre de N/mm^2, qui exprime la résistance à la rupture d'un métal, est le même que le nombre de *newtons* qui mesure l'effort nécessaire pour rompre un fil de 1 *millimètre carré* de section.

Système M. Kp. S. : $(R_r)_e = \frac{F_r \text{ en } kgf}{S \text{ en } mm^2}$.

$(R_r)_e$ s'exprime en kgf/mm^2.

3° **Allongement pour cent** : A %.

L'allongement maximum de rupture a_r est égal à la différence des longueurs de l'éprouvette après rupture L', et avant essai L :

$$a_r = L' - L.$$

Pour une longueur d'éprouvette de 1 mm, cet allongement serait de $\frac{L' - L}{L}$.

Pour une éprouvette de 100 mm de longueur initiale il serait :

$$A\,\% = \frac{L' - L}{L} \times 100.$$

La valeur ainsi trouvée prend le nom d'*allongement pour cent.*

4° **Module d'élasticité** : E (N/mm^2).

Si a désigne l'allongement de limite élastique, L la longueur initiale de l'éprouvette et F_e l'effort de limite élastique, on a :

$$i = \frac{a}{L}.$$

i est appelé *allongement relatif élastique.*

Le module d'élasticité E est donné par la relation :

$$E = \frac{R'_e}{i} = \frac{\frac{F_e}{S}}{\frac{a}{L}} = \frac{F_e \times L}{S \times a}.$$

E qui s'exprime en N/mm^2 est trouvé constant pour tous les aciers et a pour valeur 200 000 N/mm^2 ou 20 000 kgf/mm^2.

On remarquera que l'on a, pour les efforts inférieurs à l'effort de limite élastique :

$$E = \frac{\frac{F_1}{S}}{\frac{a_1}{L}} = 200\,000 \text{ N/mm}^2 \text{ pour les aciers.}$$

5° **Applications numériques.**

Au cours d'un essai de traction sur une éprouvette d'acier de 150 mm² de section et de 100 mm de longueur, on a enregistré les résultats suivants :

Charge de limite élastique : $F_e = 38\,000$ N ou 3 800 kgf.
Charge de rupture : $F_r = 60\,000$ N ou 6 000 kgf.
Longueur après rupture : $L' = 127$ mm.

Solution dans le système M. Kp. S. :

On a : $R'_e = 3\,800 : 150 = 25$ kgf/mm².

$$(R_r)_e = 6\,000 : 150 = 40 \text{ kgf/mm}^2.$$

$$A\,\% = \frac{127 - 100}{100} \times 100 = 27\,\%.$$

$$E = \frac{R'_e}{\frac{a}{L}} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{R'_e \times L}{E} = \frac{25 \times 100}{20\,000} = 0{,}125 \text{ mm,}$$

en prenant $E = 20\,000$ kgf/mm².

Solution dans le système M. K. S. A. :

$$R_e = 38\,000 : 150 = 250 \text{ N/mm}^2.$$

$$(R_r)_e = 60\,000 : 150 = 400 \text{ N/mm}^2.$$

$$E = \frac{R'_e}{\frac{a}{L}} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{R'_e \times L}{E} = \frac{250 \times 100}{200\,000} = 0{,}125 \text{ mm,}$$

en prenant $E = 200\,000$ N/mm².

B. — Essais au choc

1° Généralités.

On dit qu'un corps est *fragile* lorsqu'il se rompt sous l'action de chocs ou d'efforts brusques. Un choc est caractérisé par l'*énergie* qu'il met en jeu.

Les essais au choc ont pour objet de déterminer le travail nécessaire pour rompre une éprouvette de section connue. Plus celui-ci est petit et plus est fragile le métal qui la constitue.

L'aptitude que possède un métal à résister au choc s'appelle la *résilience* que l'on désigne par la lettre K.

Un métal résistant bien au choc a une grande résilience.

La résilience est mesurée par le travail de choc nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette de 1 cm² de section.

Elle s'exprime en *joules*.

Système M. K. S. A. : *joules par centimètre carré* (J/cm²).

Système M. Kp. S. : *kilogrammètres par centimètre carré* (kgm/cm²).

Il est intéressant de rappeler que

$$1 \text{ kgm} = 9{,}81 \text{ J} \simeq 10 \text{ J}.$$

2° Éprouvettes.

a) *Barreaux non entaillés.*

Utilisés pour les fontes, ces barreaux doivent être coulés attachés aux pièces dont on veut essayer le métal. Les barreaux, de dimensions 40 × 40 × 250, reposent sur des appuis, ou couteaux, distants de 160 mm.

b) *Barreaux entaillés.*

La forme normalisée est donnée par la *figure* 4. Les éprouvettes sont usinées avec précision.

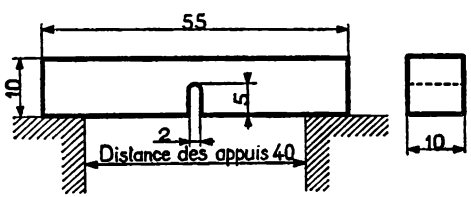


Fig. 4. — Éprouvette entaillée pour essai de choc.

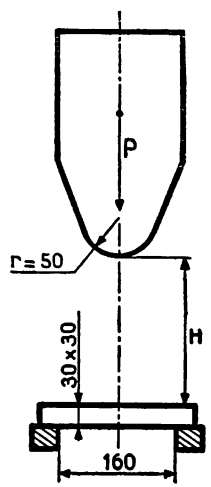


Fig. 5. — Schéma du mouton ordinaire.

3° Machines d'essais.

a) *Mouton ordinaire.*

Il est constitué par une masse de 12 kg pouvant tomber d'une hauteur variable. Cette masse comporte une partie saillante, terminée par un arrondi (*fig.* 5).

Avec ce mouton, il est impossible de déterminer la hauteur de chute pour laquelle le travail, mesuré par P × H, correspond exactement à l'énergie nécessaire pour provoquer la rupture de l'éprouvette.

On se contente de préciser les conditions de l'essai. Par exemple, il sera spécifié que l'éprouvette de 40 × 40, en fonte, ne doit pas casser lorsqu'on fait tomber successivement le mouton de 0,25 m, 0,30 m, 0,35 m, 0,40 m.

Ce mouton est uniquement utilisé pour l'essai des fontes.

b) *Mouton de Frémont.*

C'est un mouton ordinaire complété par un système de ressorts destinés à enregistrer l'énergie en excès après rupture de l'éprouvette (voir *fig.* 6). Cette énergie, qui est proportionnelle à la flèche prise par les ressorts, est mesurée par le déplacement d'un curseur sur une réglette graduée en *joules* ou en *kilogrammètres*.

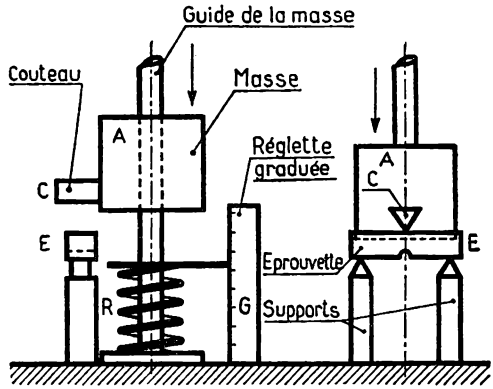


Fig. 6. — Mouton de Frémont.

Si le mouton de masse 12,5 kg tombe d'une hauteur de 2 m et si l'énergie résiduelle mesurée sur la réglette est de 60 J, on a :

Énergie disponible avant choc : 125 × 2 = 250 J.
125 N est le poids de la masse mobile.

Énergie absorbée par le choc : 250 — 60 = 190 J. Si l'éprouvette a une section de 2 cm², la résilience a pour valeur : $\frac{190}{2}$ = 95 J/cm², soit 9,5 kgm/cm².

c) *Mouton pendulaire de Charpy.*

Le pendule est constitué par une masse M en acier forgé qui peut osciller autour d'un axe O (*fig.* 7). La masse pendulaire a la forme d'un disque présentant une entaille biseautée ou couteau. L'éprouvette se place sur le bâti en T, de façon que le plan d'oscillation coïncide avec le plan axial de l'entaille. Le pendule

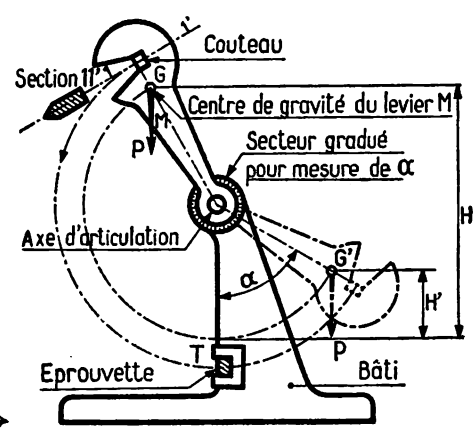


Fig. 7. — Mouton pendulaire de Charpy. —→

est remonté, puis lâché. Il passe entre les jambes du bâti, brise l'éprouvette et remonte jusqu'en G'. Au moment où le couteau entre en contact avec l'éprouvette, l'énergie disponible est égale à P × H.

Une partie de cette énergie est absorbée par la rupture de l'éprouvette ; l'énergie en excès, qui permet au pendule de remonter jusqu'en G', a pour valeur P × H'.

Le travail nécessaire pour briser l'éprouvette est donc :

$$(P \times H) - (P \times H') = P(H - H').$$

Si S est la section de l'éprouvette en cm^2, la résilience est :

$$K = \frac{P(H - H')}{S}.$$

C. — Essais de fatigue

Les essais usuels de traction, choc, dureté ne permettent pas de qualifier les métaux en vue de toutes leurs applications.

Ces essais supposent des efforts simples et constants.

Or, dans la plupart des applications, les efforts appliqués sont variables et les percussions répétées.

Soumises à ces efforts, certaines pièces se rompent au bout d'un temps plus ou moins long, sans que jamais la contrainte en un point quelconque n'ait dépassé la résistance à la rupture et même la contrainte de limite élastique.

Les constructeurs ont dû examiner les conditions de résistance des matériaux soumis à des efforts variables dans le temps.

1° Classification des sollicitations.

Il existe trois sortes de sollicitations aux efforts en fonction du temps, qu'il s'agisse de traction, compression, flexion, torsion ou cisaillement.

a) *Sollicitations alternées.*

Les efforts changent de sens alternativement entre deux valeurs extrêmes + F et — F égales et de signe contraire. C'est, par exemple, le cas de la lame soumise à un effort dirigé suivant xx' et dont l'intensité est une fonction sinusoïdale du temps. Les positions extrêmes prises par l'extrémité sont A_1 et A_2 (*fig.* 8).

La variation de l'effort correspondant au déplacement de l'extrémité de la pièce de A_1 en A_2, puis retour de A_2 en A_1, porte le nom d'*alternance* ou *cycle de l'effort.*

b) *Sollicitation répétée.*

Les efforts sont toujours de même sens et varient de zéro à une valeur maximum puis de ce maximum à zéro.

C'est le cas d'une pièce fléchie dont l'extrémité B, soumise à un effort variable, de même direction et de même sens, se déplacerait de B_1 en B_2 (*fig.* 9).

L'alternance correspond au déplacement de B_1 en B_2 et de B_2 en B_1.

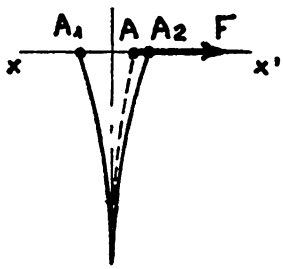


Fig. 8. — Pièce soumise à une sollicitation de flexion alternée.

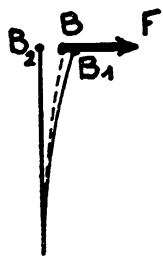


Fig. 9. — Pièce soumise à une sollicitation de flexion répétée.

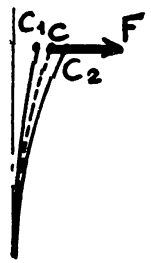


Fig. 10. — Pièce soumise à une sollicitation de flexion ondulée.

c) *Sollicitation ondulée.*

Les efforts ne changent pas : leur variation a lieu d'une valeur minimum F_1 à une valeur maximum F_2.

C'est le cas d'une pièce fléchie dont l'extrémité C, soumise à un effort variable, de même direction et de même sens, se déplacerait de C_1 à C_2 et de C_2 à C_1 (*fig.* 10).

d) *Variation des efforts.*

La variation des efforts appliqués, en fonction du temps, peut être considérée comme étant sinusoïdale ; elle est représentée par le graphique ci-contre (fig. 11).

Dans chaque cas l'effort périodique est la résultante d'un effort constant T et d'un effort à variation alternative P.

L'effort appliqué à chaque instant est donné par la relation

$$F = T + P \sin \omega t.$$

Dans le cas des sollicitations alternées, $T = 0$.

Dans le cas des sollicitations répétées, $T = P$.

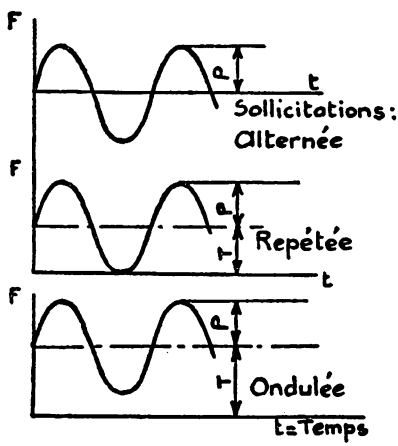


Fig. 11. — Diagramme des efforts en fonction du temps.

2° Les principaux essais.

On a conçu des machines permettant de réaliser sur des éprouvettes :

a) **des efforts axiaux** : traction et compression ;

b) **des flexions** : flexions planes et flexions rotatives ;

c) **des torsions.**

Ces différentes machines ont permis de déterminer la limite de fatigue.

Il existe, pour chaque métal soumis à un effort variable, quelle que soit la nature de l'effort, une limite de résistance appelée *limite de fatigue.* Elle correspond à l'amplitude maximum de l'effort qui peut être appliquée indéfiniment sans provoquer la rupture. En fait, on ne recherche pas cette limite théorique qui n'a que peu d'importance, étant donné que toutes les pièces ont une durée limitée en raison de l'usure, de la corrosion, du manque de possibilités techniques.

On considère une limite pratique pour laquelle la rupture ne se produit pas au bout de 20, 30 ou 100 millions d'alternances.

a) *Détermination de la limite pratique de fatigue.*

On expérimente une série d'éprouvettes d'un même métal. On applique des charges croissantes F_1, F_2, F_3, F_4, etc. et on enregistre le nombre d'alternances n_1, n_2 n_3, n_4, etc. pour lesquelles les éprouvettes se rompent. On calcule les contraintes f_1, f_2, f_3, f_4, etc. correspondant à ces efforts, en appliquant les formules classiques de la traction, de la flexion ou de la torsion.

Si l'on trace la courbe des contraintes en fonction du nombre d'alternances, on obtient une courbe qui a l'allure d'une hyperbole (*fig.* 12).

Elle montre très nettement que, pour une sollicitation correspondant à une contrainte très peu inférieure à 280 N/mm², la durée de l'éprouvette est de beaucoup supérieure à 30 millions d'alternances.

L'asymptote horizontale à la courbe qui correspond à une durée illimitée de l'éprouvette coupe l'axe des f à environ 278 N/mm².

Le nombre minimum d'alternances, qui doit être enregistré avant rupture pour la détermination de la limite de fatigue, est généralement de 30 millions pour les alliages ferreux et 100 millions pour les alliages d'aluminium.

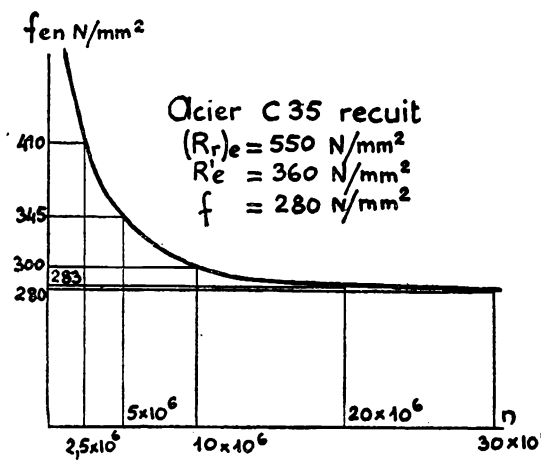


Fig. 12. — Diagramme des contraintes de fatigue en fonction du nombre d'alternances avant la rupture de l'éprouvette.

b) *Les machines d'essai.*

Nous ne décrirons que deux types de machines les plus employées : les machines pour *efforts axiaux* et les machines de *flexion rotative.*

a) *Machine de traction ondulée axiale :* **Vibrophore Amsler.**

L'éprouvette est montée entre deux mâchoires : l'une est solidaire du bâti et l'autre est fixée au berceau de la machine par l'intermédiaire d'un ressort dont la tension peut être réglée par un écrou. Un électro-aimant alimenté en courant alternatif peut faire varier la tension du ressort et par suite celle de l'éprouvette (voir *fig.* 13). En faisant varier la tension initiale du ressort, la force d'attraction de l'électro-aimant et la fréquence du courant, on fait varier les conditions de l'essai.

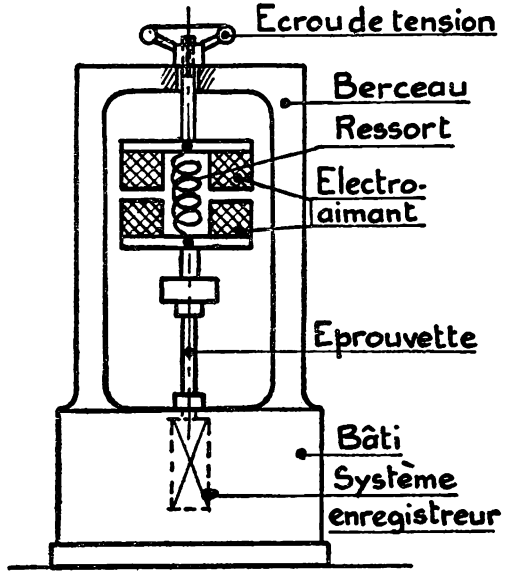


Fig. 13. — Schéma de principe du Vibrophore Amsler. ——→

b) *Machine de flexion rotative :*

Principe.

Considérons une éprouvette cylindrique travaillant à la flexion (*fig.* 14). Marquons 2 points A et B disposés diamétralement. Pour une position de l'éprouvette, nous avons par exemple traction en A et compression en B. Si nous faisons faire un demi-tour à l'éprouvette, l'effort conservant toujours le même sens, B devient tendu et A comprimé.

Ainsi, pendant la rotation, les fibres de l'éprouvette sont alternativement tendues et comprimées.

La machine d'essai comprend un moteur électrique à arbre creux. L'éprouvette, emmanchée dans cet arbre par l'intermédiaire d'une portée

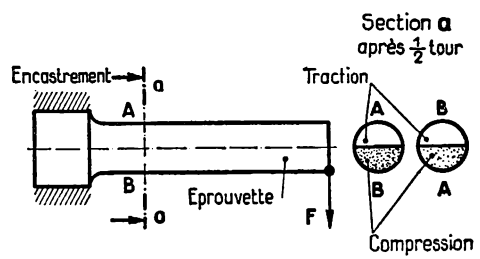


Fig. 14. — Variation de la nature des contraintes dans une fibre d'un arbre tournant soumis à la flexion.

conique, est soumise, à l'une de ses extrémités, à un effort dont l'intensité peut être réglée en déplaçant plus ou moins l'effort sur le levier (*fig.* 15). La forme de l'éprouvette est étudiée pour que la rupture se produise en un endroit précis. Sur l'éprouvette *modèle aéronautique* (*fig.* 15 *bis*) la section de rupture correspond environ à un diamètre de 5,62 mm.

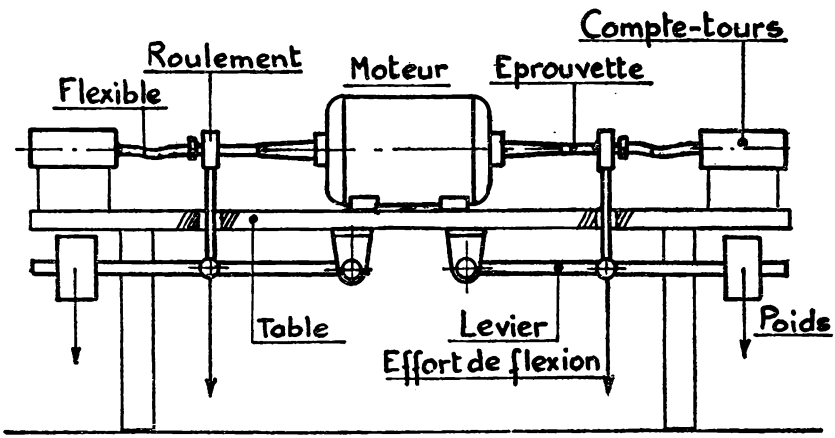


Fig. 15. — Schéma d'une machine de flexion rotative.

Un compte-tours permet d'enregistrer le nombre d'alternances. Lorsque l'éprouvette est cassée, la contrainte correspondante est égale à :

$$f = \frac{M}{\frac{I}{v}} = \frac{P \times l}{0{,}1\, d^3} = \frac{P \times 70}{0{,}1 \times 5{,}62^2}.$$

Si P est exprimé en *newtons*, f sera trouvée en N/mm^2.

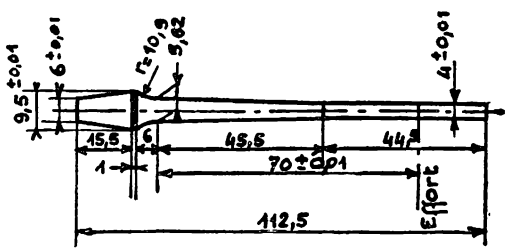


Fig. 15 *bis.* — Éprouvette de flexion rotative *modèle aéronautique.*

L'essai est assez long, puisque si le moteur tourne à 3 000 tr/mn il faut 167 heures, soit près de 7 jours, pour effectuer 30 millions d'alternances. Aussi, pour tracer rapidement plusieurs points de la courbe, on équipe les laboratoires d'essai de plusieurs machines et on monte deux éprouvettes à chaque extrémité des arbres des moteurs (voir *fig.* 15).

c) *Résultats obtenus.*

1° Influence du nombre de cycles d'efforts sur la limite de fatigue.

La limite de fatigue varie peu avec la fréquence des efforts. La fréquence expérimentale choisie est comprise entre 50 et 200 cycles par seconde.

2° Influence de l'état des surfaces.

Les rayures d'outil qui constituent des amorces de cassure diminuent dans des proportions sensibles la limite de fatigue.

On constate une diminution de 12 % de la limite de fatigue en passant d'une surface rectifiée finement à une surface présentant des rayures d'outil de tour, avec avance de 0,05, et 20 % lorsque la surface est ébauchée avec une avance de 0,2.

Certains traitements thermiques incorrectement exécutés (décarburation superficielle, oxydation) produisent également une diminution de la limite de fatigue.

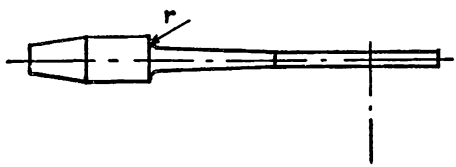


Fig. 16. — Éprouvette permettant de montrer l'influence des rayons de raccordement sur la limite de fatigue.

3° Influence de la forme des pièces.

Les angles vifs aux changements de section ou les congés insuffisants diminuent la limite de fatigue dans de notables proportions.

Voici pour l'éprouvette (*fig.* 16) la variation de la limite de fatigue en fonction du rayon *r*.

Rayon	Pièce en acier C 20 étiré	Pièce en acier au nickel chrome traité
4	240 N/mm^2	440 N/mm^2
1	180 »	330 »
0,25	160 »	275 »

Il est donc intéressant, en construction mécanique, de supprimer les angles vifs intérieurs.

4° Influence des dimensions des pièces.

Il est évident que les défauts de tous ordres, et notamment ceux de surface, prennent plus d'importance lorsque les pièces ont de petites dimensions. Aussi n'est-il pas étonnant que la limite de fatigue croisse avec les dimensions des pièces.

5° Relation entre la limite de fatigue *f*, la résistance à la rupture à la traction $(R_r)_e$ et la contrainte de limite élastique.

De nombreuses expériences ont permis d'étudier les limites de variation du rapport $\frac{f}{(R_r)_e}$ désigné sous le nom de *rapport d'endurance.*

On peut dire que, d'une façon générale, le rapport $\frac{f}{(R_r)_e}$ diminue lorsque $(R_r)_e$ augmente. La trempe, par exemple, augmente bien la valeur de f pour les aciers au carbone, mais beaucoup moins que $(R_r)_e$.

— Pour les aciers, ce rapport qui varie de 0,25 à 0,66 a une valeur moyenne de 0,45.

— Pour les alliages de magnésium forgés et les alliages d'aluminium type duralumin, la valeur moyenne de $\frac{f}{(R_r)_e}$ est 0,35.

— Pour les alliages cuivreux, ce rapport varie de 0,25 à 0,35.

Le rapport de la limite de fatigue à la contrainte de limite élastique $\frac{f}{R'_e}$ est, pour les aciers, rarement supérieur à 1. La valeur moyenne est 0,8. Pour le duralumin et les alliages de magnésium, la valeur moyenne de $\frac{f}{R'_e} = 0{,}5$.

D. — Essais de dureté

1° Définition.

La *dureté* est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps.

Elle est caractérisée par un *nombre* qui dépend du genre d'essai exécuté.

2° Essai à la bille Brinell.

a) *Principe.*

Sur une bille d'acier trempé de 10 mm de diamètre, placée sur la pièce à essayer, on exerce le poids d'une masse de 3 000 kg (soit 30 000 N) passant par le centre de la bille et normal à la surface de la pièce. La bille pénètre d'autant plus que la dureté du métal à essayer est petite (*fig.* 17). La durée d'application de l'effort est d'environ 15 secondes.

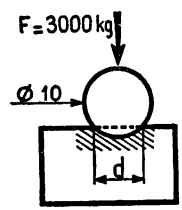


Fig. 17. — Principe de l'essai de dureté à la bille.

Si la surface de la calotte sphérique obtenue est S mm², le rapport : $HB = \frac{F}{S}$

définit la dureté du métal essayé ; on l'appelle *nombre de Brinell.*

Dans le système M. K. S. A. : $HB = \frac{30\,000}{S}$ N/mm² et, dans le système M. Kp. S. :

$$HB = \frac{3\,000}{S} \text{ kgf/mm}^2.$$

Exemple. — Surface de l'empreinte = 15 mm².

$$HB = \frac{30\,000}{15} = 2\,000 \text{ N/mm}^2.$$

Pour calculer la surface de l'empreinte, il suffit d'en mesurer le diamètre d (D étant le diamètre de la bille), car :

$$S = \frac{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}{2}.$$

Il est aisé de voir qu'il existe une relation entre H B et d. Pour éviter des calculs, on utilise un tableau dont nous donnons ci-dessous un résumé.

d	HB N/mm^2	HB kgf/mm^2	d	HB N/mm^2	HB kgf/mm^2	d	HB N/mm^2	HB kgf/mm^2
2	9 460	946	3,5	3 020	302	5	1 430	143
2,5	6 000	600	4	2 280	228	5,5	1 160	116
3	4 180	418	4,5	1 790	179	6	950	95

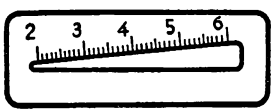


Fig. 18. — Règle Le Chatelier pour mesurer le diamètre des empreintes de billes.

Le diamètre d doit être mesuré avec précision à 0,1 mm près. La mesure peut se faire facilement au moyen de la *règle Le Chatelier* (*fig.* 18). Elle est constituée par une plaque de verre portant sur l'une de ses faces deux lignes concourantes dont l'une est graduée, les divisions étant espacées de 1 ou 2 mm; elles correspondent à des diamètres différents de 1/10 de mm.

Le microscope d'atelier ou la loupe compte-fils sont le plus souvent utilisés.

On peut employer, pour les essais, des billes de diamètres différents :

$$\varnothing = 10\,;\quad 5\,;\quad 2{,}5 \quad \text{ou} \quad 1.$$

Les charges à appliquer (exprimées en *newtons*) sont, le plus souvent, égales à 300 D^2, soit pour les diamètres de billes donnés ci-dessus :

30 000 N pour la bille de 10,
7 500 N pour la bille de 5.
1 875 N pour la bille de 2,5.
300 N pour la bille de 1.

Il est aussi possible d'utiliser des charges (exprimées en *newtons*) égales à 100 D^2, 50 D^2 ou 20 D^2.

On choisit le diamètre de bille et la charge correspondante, de telle sorte qu'aucune déformation ne soit visible sur la face opposée à celle de l'application d l'effort.

Symboles.

La dureté Brinell doit être désignée par un symbole qui rappelle les conditions de l'essai. Ce symbole est H B pour l'essai à la bille de 10, avec 30 000 N de charge.

Pour les autres conditions, on ajoute à la lettre H trois chiffres représentant le *diamètre de la bille*, la *charge*, la *durée de l'application de l'effort* en secondes.

EXEMPLE

Système M. K. S. A. : H 5/7 500/15

5 = Ø de la bille ; 7 500 N ; 15 secondes.

Système M. Kp. S. : H 5/750/15

5 = Ø de la bille ; 750 kgf ; 15 secondes.

b) *Appareils d'essai.*

L'appareil à biller Guillery est le plus simple (*fig.* 19).

L'effort de 30 000 N est obtenu grâce à l'action de rondelles Belleville.

La bille de 10 mm est montée à l'extrémité d'une vis, et la pièce à essayer est placée sur un support à rotule soutenu par le paquet de rondelles Belleville.

Un volant permet d'assurer la rotation de la vis par l'intermédiaire d'un moyeu et d'une clavette coulissante. Comme la vis s'engage dans un écrou fixé au bâti, la bille peut être amenée en contact avec la pièce. La pression initiale de la bille est limitée et maintenue constante, pour tous les essais, grâce à un système d'entraînement à friction. Le bras de commande étant manœuvré, la came produit la rotation du levier autour du point *a*. Le couteau *b* se trouve soulevé ; les rondelles Belleville, comprimées, exercent leur action sur la pièce et la bille pénètre dans le métal. Pour tenir compte des déformations élastiques, il y a lieu de ramener le bras de manœuvre en arrière, de remettre en contact la bille avec la pièce en tournant le volant, puis de comprimer à nouveau les rondelles.

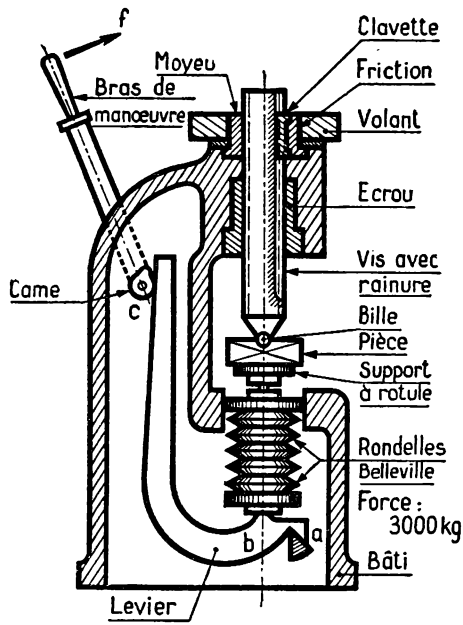


Fig. 19. — Appareil à biller Guillery.

On répétera cette opération jusqu'à ce que la pièce conserve le contact avec la bille quand l'effort dû aux rondelles est supprimé. En général trois opérations suffisent. La dernière charge doit être maintenue 15 secondes pour les alliages ferreux et 30 secondes pour les alliages non ferreux.

3° Essais de dureté à la bille basés sur la méthode de comparaison.

a) *Principe.*

Disposons une bille entre la pièce à mesurer et un petit cube étalon de dureté connue H (*fig.* 20). Si on exerce un effort P sur ce cube, la bille pénètre à la fois dans la pièce et dans le cube étalon.

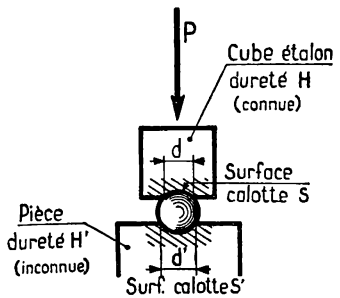


Fig. 20. — Principe de la mesure de dureté à la bille par comparaison.

Pour la pièce, le nombre de Brinell est :

$$H' = \frac{P}{S'}.$$

Pour le cube étalon :

$$H = \frac{P}{S}.$$

En divisant ces égalités membre à membre, on a :

$$\frac{H'}{H} = \frac{P}{S'} : \frac{P}{S} = \frac{P}{S'} \times \frac{S}{P} = \frac{S}{S'}$$

d'où :

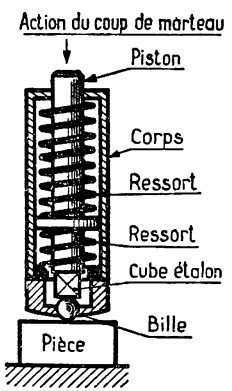
$$H' = H \times \frac{S}{S'}.$$

Connaissant les diamètres d'empreinte d et d', il est possible de calculer s et s' et, comme la dureté H est donnée, on en déduit la dureté H' de la pièce.

b) *Appareil d'essai.*

L'**appareil portatif à biller Turpin** est livré avec un certain nombre de cubes étalons de dureté connue (*fig.* 21).

Le cube étalon est placé à l'intérieur du support de bille, monté sur le corps tubulaire au moyen d'un emmanchement à baïonnette. Un système de ressorts assure le contact du cube, d'une part avec le piston, d'autre part avec la bille.



En appuyant alors l'appareil sur la pièce à essayer, de manière que seule la bille touche cette pièce, on le maintient de la main gauche dans une direction normale à la surface et on frappe un coup de marteau sur l'extrémité du piston. Il suffit alors de démonter le cube, de mesurer les deux empreintes et d'utiliser la règle à calcul pour obtenir la dureté de la pièce.

Cet appareil portatif peut être utilisé pour biller des pièces encombrantes ou qui ne peuvent être démontées.

← *Fig.* 21. — Appareil portatif à biller Turpin.

4° Relation entre la résistance à la rupture par traction et le nombre de dureté Brinell.

Les essais ont montré que, pour les aciers au carbone recuits :

$$(R_r)_e = 0{,}35 \text{ HB}.$$

$(R_r)_e$ et H B exprimés en N/mm^2.

Ainsi, un acier qui présentera une dureté : H B = 2 000 aura une résistance :

$$(R_r)_e = 2\,000 \times 0{,}35 = 700 \text{ N/mm}^2.$$

Pour les aciers trempés le coefficient varie de 0,3 à 0,36.

On a pu ainsi établir un tableau donnant la valeur de $(R_r)_e$ en fonction du diamètre d d'empreinte Brinell sous une charge de 30 000 N.

Nuance de l'acier	d en mm	HB en N/mm^2	$(R_r)_e$ en N/mm^2
Extra doux C 5 à C 20.....	5,9 à 5,3	980 à 1 260	350 à 450
Doux C 20 à C 30.....	5,3 à 4,8	1 260 à 1 540	450 à 550
1/2 dur C 30 à C 40.....	4,8 à 4,4	1 540 à 1 830	550 à 650
Dur C 40 à C 50.....	4,4 à 4,1	1 830 à 2 100	650 à 750
Extra dur C 50 à C 85	4,1 à 3,6	2 100 à 2 800	750 à 1 000

Remarque. — La relation indiquée plus haut ne donne que des résultats approximatifs, suffisants dans bien des cas. L'essai à la bille ne peut pas toujours remplacer l'essai de traction sur éprouvette.

5° Essai de dureté Vickers.

On utilise une pointe de diamant ayant la forme d'une pyramide à base carrée dont l'angle au sommet a 136°. La force de pénétration P est comprise entre 50 et 1 250 N (50-100-200-300-500-800-1 200 et 1 250 N).

Au moyen d'une lunette spéciale, on mesure, sur la pièce, la diagonale d mm de la base carrée de l'empreinte pyramidale.

La surface de l'empreinte a pour valeur :

$$S\ mm^2 = \frac{d^2}{2 \sin \frac{136°}{2}} = \frac{d^2}{1{,}854}.$$

La dureté Vickers s'exprime par le rapport :

$$HV = \frac{P}{S} = \frac{1{,}854\ P}{d^2} \text{ N/mm}^2.$$

6° Essai de dureté Rockwell.

a) *Principe.*

On utilise comme corps pénétrant une pointe de diamant légèrement arrondie dont l'angle au sommet est de 120°.

Le diamant est monté sur une pièce métallique ; l'ensemble porte le nom de *cône Brasle* (*fig.* 22).

L'effort exercé varie avec la dureté du métal essayé. Il ne dépasse pas 1 500 N.

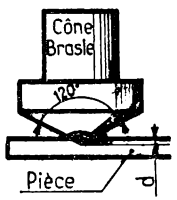


Fig. 22. — Cône Brasle à pointe de diamant.

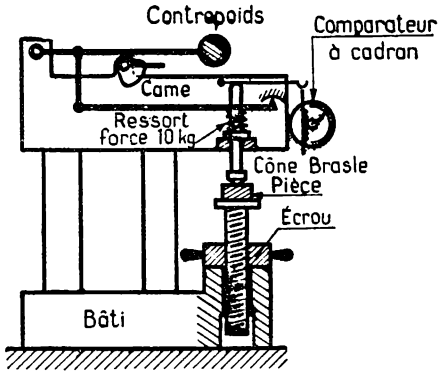


Fig. 23. — Schéma de principe de la machine Rockwell.

La dureté est donnée par la profondeur d de l'empreinte, exprimée en centièmes de mm, et mesurée au moyen d'un comparateur.

Pour les métaux tendres, une petite bille d'acier de diamètre égal à 1/16 ou 2/16 de pouce (1,6 ou 3,2 mm) remplace la pointe de diamant.

Il y a donc plusieurs nombres caractérisant la dureté Rockwell.

a) **Dureté C** : obtenue avec la pointe de diamant. La charge est de
$$150 \text{ kgf} \simeq 1\,500 \text{ N}. \quad \textit{Symbole} : \text{HR}_c.$$

b) **Dureté B** : obtenue avec une bille de $\frac{1}{16}$ de pouce et une charge de
$$100 \text{ kgf} \simeq 1\,000 \text{ N}. \quad \textit{Symbole} : \text{HR}_b.$$

c) **Dureté E** : obtenue avec une bille de $\frac{2}{16}$ de pouce et une charge de
$$100 \text{ kgf} \simeq 1\,000 \text{ N}. \quad \textit{Symbole} : \text{HR}_e.$$

d) **Dureté F** : obtenue avec une bille de $\frac{1}{16}$ de pouce et une charge de
$$60 \text{ kgf} \simeq 600 \text{ N}. \quad \textit{Symbole} : \text{HR}_f.$$

b) *Machine d'essai Rockwell (fig. 23).*

La pièce étant placée sur le support à vis et la came étant relevée, on soulève la pièce en tournant l'écrou jusqu'à ce que le ressort comprimé exerce une force $P_0 = 10$ kgf $\simeq 100$ N. La couche superficielle de la pièce étant brisée, on libère

le contrepoids au moyen de la came : un effort $P = 100$ kgf $\simeq 1\,000$ N s'exerce alors sur la pointe de diamant ou sur la bille. Le comparateur à cadran fait connaître la dureté cherchée.

Mode opératoire.

a) Le pénétrateur est amené normalement au contact de la surface à essayer, et enfoncé sans choc sous la charge initiale $P_0 = 10$ kgf $\simeq 100$ N.

b) On amène l'origine de la graduation du comparateur en face de l'indicateur d'enfoncement correspondant au nombre 100 dans le cas d'emploi du diamant, et 130 dans le cas d'emploi de la bille.

c) On applique au pénétrateur, progressivement et sans choc, la surcharge P_1 qui a pour valeur :

— essai HR_c = 140 kgf $\simeq$ 1 400 N,
— essai HR_b et HR_e = 90 kgf $\simeq$ 900 N,
— essai HR_f = 50 kgf $\simeq$ 500 N.

L'effort total de pénétration est respectivement de

$$P = P_0 + P_1 = 140 + 10 = 150 \text{ kgf}; 100 \text{ kgf}; \text{ et } 60 \text{ kgf}.$$

d) Lorsque l'indicateur d'enfoncement s'est arrêté, on supprime la surcharge P_1 de manière à ramener la charge à la valeur $P_0 = 10$ kgf.

En raison de la suppression des déformations élastiques résultant de l'application de P_1, la pointe de diamant remonte légèrement. L'aiguille du comparateur revient un peu en arrière.

e) On lit alors sur le cadran de l'appareil l'accroissement rémanent *e* de l'enfoncement du pénétrateur, d'où l'on déduit la dureté. Chaque division du comparateur correspond à un déplacement du pénétrateur de 0,002 mm.

Si *e* est exprimé en millièmes de mm (en μ), la dureté Rockwell s'exprime par un nombre qui a pour valeur :

— *dureté* C : $HR_c = 100 - \frac{e}{2}$

— *duretés* B, E, F : HR_b, HR_e ou $HR_f = 130 - \frac{e}{2}$.

La *figure* 24 résume les différentes opérations de la mesure.

L'épaisseur de la pièce à essayer ne doit pas être inférieure à 10 *e*. Exprimée en *mm*, cette épaisseur a pour valeur :

— *essai* C : 2 — 0,02 HR_c
— *essais* B, E, F : 2,6 — 0,02 HR_b, HR_e ou HR_f.

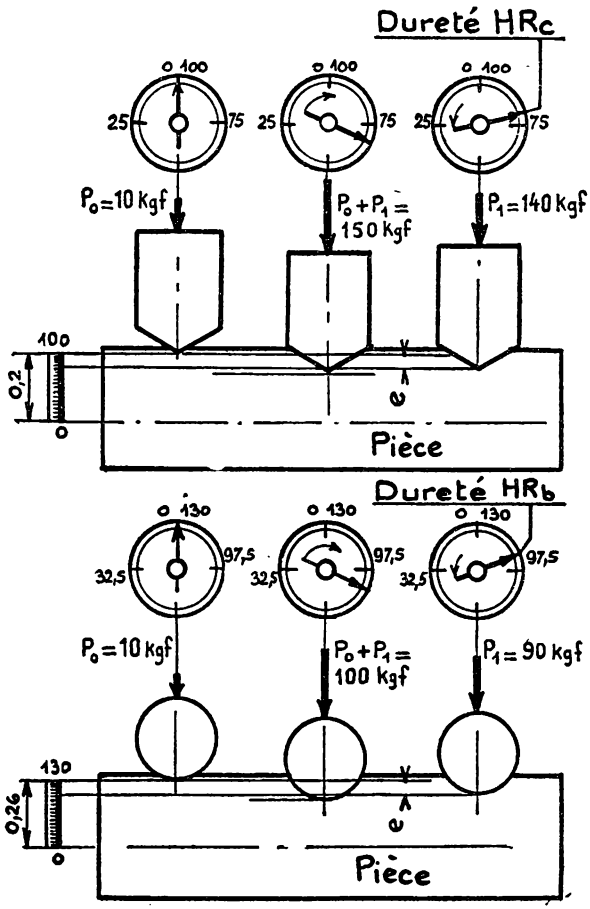


Fig. 24. — Étapes de la mesure Rockwell.

Il existe des *tables de conversion* des duretés Rockwell en duretés Brinell et en résistance à la traction. Il faut les utiliser avec beaucoup de circonspection, car il n'existe pas de relation précise entre ces mesures.

A titre indicatif, nous donnons en fin de chapitre un extrait de table de conversion.

7° Comparaison entre les différentes méthodes de mesure de dureté par pénétration.

L'essai par la *méthode Brinell* est long (durée : une à deux minutes). Il laisse sur la pièce une empreinte large et profonde.

Il ne peut donc être employé sans inconvénient :

— sur les surfaces usinées ;

— sur les pièces très dures (aciers trempés), car la bille risquerait de s'écraser ;

— sur les tôles minces, ou sur les pièces qui présentent une couche durcie de faible épaisseur (pièces cémentées ou nitrurées), car l'effort important exercé sur la bille provoque l'emboutissage de la tôle ou le défonçage de la couche durcie.

Par contre, l'*essai à la bille Brinell* convient parfaitement pour la mesure de la dureté et, par suite, de la résistance à la rupture des pièces à l'état brut : barres laminées.

Les essais *Vickers* et *Rockwell* ne laissent sur les pièces que des empreintes identiques à un léger coup de pointeau. Ils peuvent être utilisés pour la mesure de dureté des pièces usinées dures, durcies superficiellement, ou des tôles.

L'essai Rockwell, très rapide (quelques secondes), est le plus employé : il permet la mesure de la dureté en série.

8° Mesure de la dureté par le rebondissement.

Principe.

Si on laisse tomber un corps élastique, de poids P, sur la surface plane et horizontale d'un corps imparfaitement élastique, le choc s'accompagne d'une absorption d'énergie. La hauteur de rebondissement h est inférieure à la hauteur de chute H. Le travail perdu, et qui a servi à produire une déformation plastique, est : $W = P\,(H-h)$. Plus le corps est dur, moins grand est ce travail W. La dureté est donc une fonction décroissante de $H-h$, et par suite elle croît avec h.

Le *scléroscope* SHORE est un appareil qui utilise ce principe pour comparer les duretés des différents corps.

Il comprend un mouton cylindrique en acier dont l'extrémité est faite en diamant. Un comparateur à cadran permet de mesurer la hauteur de rebondissement ; il est gradué directement en degrés de dureté Shore. La dureté shore HSh est, par définition, proportionnelle à h. Le coefficient de proportionnalité est choisi par référence à un acier à outil dont $HSh = 100$.

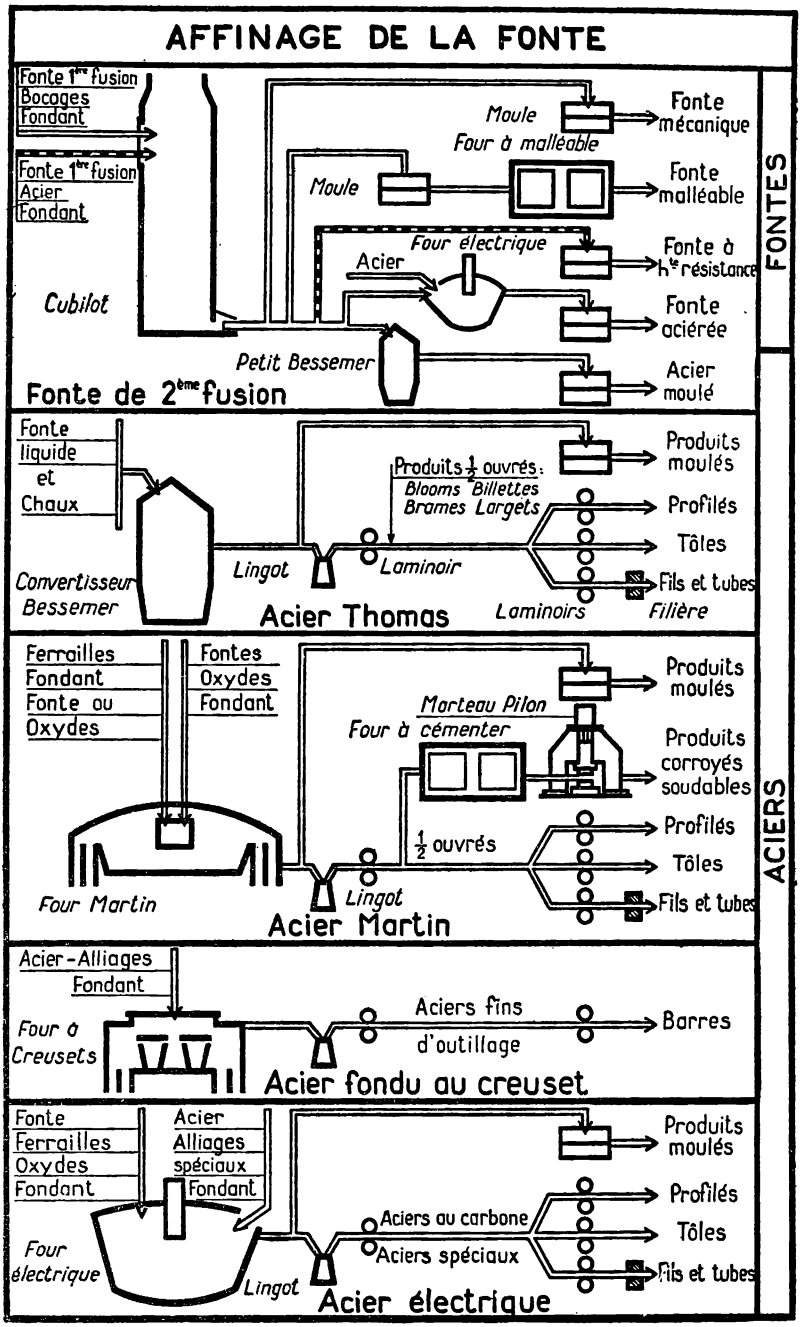
Ce procédé est assez critiqué, parce que le phénomène de rebondissement est complexe. Ses lois sont encore assez mal définies.

9° Tableau de correspondance des différents essais de dureté.

Dureté Brinell bille de 10 *mm* charge 30 000 *N*			Dureté Rockwell		Vickers	Shore
d en *mm*	HB en N/mm^2	$(R_r)_e$ en N/mm^2	Diamant HR_c	Bille HR_b	HV en N/mm^2	HS_h
2,2	7 820	2 660	72		12 200	107
2,3	7 130	2 420	67		10 200	96
2,4	6 520	2 220	63		8 670	88
2,5	6 000	2 040	59		7 460	81
2,6	5 550	1 890	56		6 490	75
2,8	4 770	1 620	49		5 340	66
3,0	4 180	1 420	44		4 350	57
3,2	3 640	1 240	39		3 800	50
3,4	3 210	1 090	35		3 200	45
3,6	2 860	970	30		2 850	40
3,8	2 550	870	26		2 550	36
4,0	2 280	780	22	98	2 260	33
4,2	2 070	700	18	95	2 090	30
4,4	1 870	640		91	1 860	28
4,6	1 700	580		86	1 710	26
4,8	1 560	530		82	1 540	24
5,0	1 430	490		76	1 440	22
5,2	1 310	450		72		
5,4	1 210	410		67		
5,6	1 120	380		62		
5,8	1 030	350		57		
6,0	970	330		53		
	a				*b*	

Si l'on souhaite exprimer les duretés Brinell et Vickers en kgf/mm^2, diviser par 10 les chiffres portés dans ce tableau aux colonnes *a* et *b*.

◇


AFFINAGE DE LA FONTE
FONTES
ACIERS
Fonte 1re fusion
Bocages
Fondant
Fonte 1re fusion
Acier
Fondant
Cubilot
Moule
Four à malléable
Fonte mécanique
Moule
Fonte malléable
Four électrique
Acier
Fonte à hte résistance
Fonte aciérée
Petit Bessemer
Acier moulé
Fonte de 2ème fusion
Fonte liquide et Chaux
Convertisseur Bessemer
Lingot
Laminoir
Produits ½ ouvrés :
Blooms Billettes
Brames Largets
Produits moulés
Profilés
Tôles
Fils et tubes
Laminoirs
Filière
Acier Thomas
Ferrailles
Fondant
Fonte ou
Oxydes
Fontes
Oxydes
Fondant
Four Martin
Lingot
Marteau Pilon
Four à cémenter
Produits moulés
Produits corroyés soudables
½ ouvrés
Profilés
Tôles
Fils et tubes
Acier Martin
Acier-Alliages
Fondant
Four à Creusets
Aciers fins d'outillage
Barres
Acier fondu au creuset
Fonte
Ferrailles
Oxydes
Fondant
Acier
Alliages spéciaux
Fondant
Four électrique
Lingot
Produits moulés
Profilés
Aciers au carbone
Tôles
Aciers spéciaux
Fils et tubes
Acier électrique

Métallurgie du fer
et de ses alliages

GÉNÉRALITÉS

Le *fer* est un métal qui a été très employé autrefois. Aujourd'hui, il est presque partout remplacé, en construction mécanique, par ses alliages : les *aciers* et les *fontes*.

Classification des métaux ferreux

1° **Fer pur** ou fer de Suède.

Fer + traces de C.

2° **Aciers.**

— a) *Aciers au carbone.*

Fer + C (moins de 1,5 %).

— b) *Aciers spéciaux.*

Fer + 0,1 à 1,5 % de C + un ou plusieurs constituants tels que

Ni — Cr — W — Va — Co — Mn — Si — Mo.

3° **Aciers sauvages.**

Fer + 1,5 à 2,3 % de C, non utilisés en raison de leur grande fragilité.

4° **Fontes.**

— a) *Fontes ordinaires.*

Fer + 2,5 à 4,5 % de C + 0,5 à 5 % de Si + 0,4 à 5 % de Mn + 0,05 à 2,2 % de P.

La quantité de phosphore permet de distinguer :

— les fontes *hématites*, qui contiennent de 0,05 à 0,12 % de P,
— les fontes *semi-hématites*, qui contiennent de 0,12 à 0,5 % de P,
— les fontes *semi-phosphoreuses*, qui contiennent de 0,5 à 1 % de P,
— les fontes *phosphoreuses*, qui contiennent plus de 1 % de P.

— b) *Fontes spéciales.*

Fonte ordinaire + nickel, chrome, aluminium, vanadium, titane, etc.

MÉTALLURGIE DE LA FONTE

A. — Minerai

Le fer étant un métal très facilement oxydable, on ne le trouve dans la nature que combiné à l'oxygène, sous forme d'oxyde de fer. Le minerai, sorte de terre rougeâtre, est constitué par de l'oxyde de fer mélangé à de la gangue composée de silice, alumine, chaux, magnésie.

B. — Principe de la métallurgie

Le minerai à traiter comprenant de l'oxyde de fer (fer + oxygène) et de la gangue, il faut, pour obtenir le métal :

1° **Libérer le fer** en faisant agir un corps susceptible de se combiner avec l'oxygène de l'oxyde.

Un tel corps est appelé *réducteur*. Pratiquement, c'est l'oxyde de carbone qui est utilisé. La réaction chimique qui se produit est la suivante :

Oxyde de fer + Oxyde de carbone = Gaz carbonique + Fer.

Fer + Oxygène + CO $\rightarrow$ CO_2

Les minerais sont constitués d'oxydes Fe_2O_3, et quelquefois Fe_3O_4. La réaction chimique de réduction est la suivante :

$$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$$

Pour que cette réduction soit possible, il est nécessaire de fournir de la chaleur. Aussi fait-on brûler un excès de carbone. On a :

Carbone + Air = Oxydes de carbone + Azote + Chaleur

C + (O + N) = CO et CO_2 + N + Chaleur

gaz

Des essais sont en cours pour utiliser, comme réducteur, l'hydrogène contenu dans les hydrocarbures constituant les gaz naturels extraits du sol (gaz de Lacq).

2° **Séparer le fer de la masse** par fusion du métal qui coule et se rassemble à la partie inférieure du four. La chaleur nécessaire à ce changement d'état est fournie par la combustion du carbone.

3° **Éliminer la gangue.** — On ajoute pour cela un fondant (pierre à chaux ou à magnésie) qui donne avec la gangue un verre grossier : le *laitier*. Plus fu-

sible et plus léger que le fer, ce laitier coule et se rassemble au-dessus du métal liquide. On peut alors l'évacuer à l'extérieur du four par *décantation*.

C. — Pratique industrielle

1° Le haut fourneau.

Industriellement, le traitement du minerai se fait dans un **haut fourneau**, sorte de four cylindro-conique en briques réfractaires et ossature métallique extérieure. C'est dans la partie inférieure, ou *creuset*, que le métal fondu s'accumule.

Le combustible utilisé est le *coke métallurgique*, car la houille est trop friable et contient trop de soufre. Le métal obtenu n'est pas du fer pur, mais un alliage de fer et de carbone (de 2,3 à 4,5 %) : la *fonte*. La proportion de carbone contenu dans la fonte est d'autant plus grande que la température à l'intérieur du haut fourneau est plus élevée. Pour faire varier cette température, il suffit de faire brûler plus ou moins de coke et de modifier la température du vent insufflé. A *allure chaude*, on obtient de la *fonte grise* riche en carbone et, à *allure froide*, de la *fonte blanche* qui en contient moins.

Notons que dans le fer se dissolvent également, en proportions assez faibles, quelques-uns des corps simples contenus dans la gangue : silicium, manganèse, phosphore et soufre.

Le haut fourneau est chargé par la partie supérieure ou *gueulard*. On introduit par couches alternées : le minerai, le fondant et le coke, qui descendent graduellement au fur et à mesure que la fonte s'élabore.

A la partie supérieure du creuset, on introduit, par les tuyères, l'air soufflé et réchauffé, nécessaire à la combustion du coke.

Pour retirer la fonte liquide qui s'accumule dans le creuset, on débouche le trou de coulée, obturé par un tampon de terre. Les laitiers, qui surnagent en raison de leur densité plus faible que celle de la fonte, s'écoulent par un orifice prévu à la partie supérieure du creuset.

Tout en haut, sous le gueulard, une tuyauterie a été aménagée pour l'évacuation des gaz chauds et combustibles produits par la réduction du minerai et la combustion du coke.

CARACTÉRISTIQUES DES HAUTS FOURNEAUX.

La capacité des hauts fourneaux peut atteindre 2 500 m^3 ; leur hauteur varie de 15 à 30 m avec, à la partie renflée, un diamètre ou ventre de 4 à 10 m et, au creuset, un diamètre de 2,50 m à 8 m. La production journalière de fonte d'un haut fourneau peut atteindre 1 800 tonnes.

Pour obtenir une tonne de fonte, il faut traiter 3 tonnes de minerai contenant 50 % d'oxyde de fer, brûler 1 tonne de coke et utiliser 1 tonne de fondant. Il y a production de 1,1 tonne de laitier et de 4 000 m^3 de gaz environ. La température maximum à l'intérieur du haut fourneau peut atteindre 1 800°.

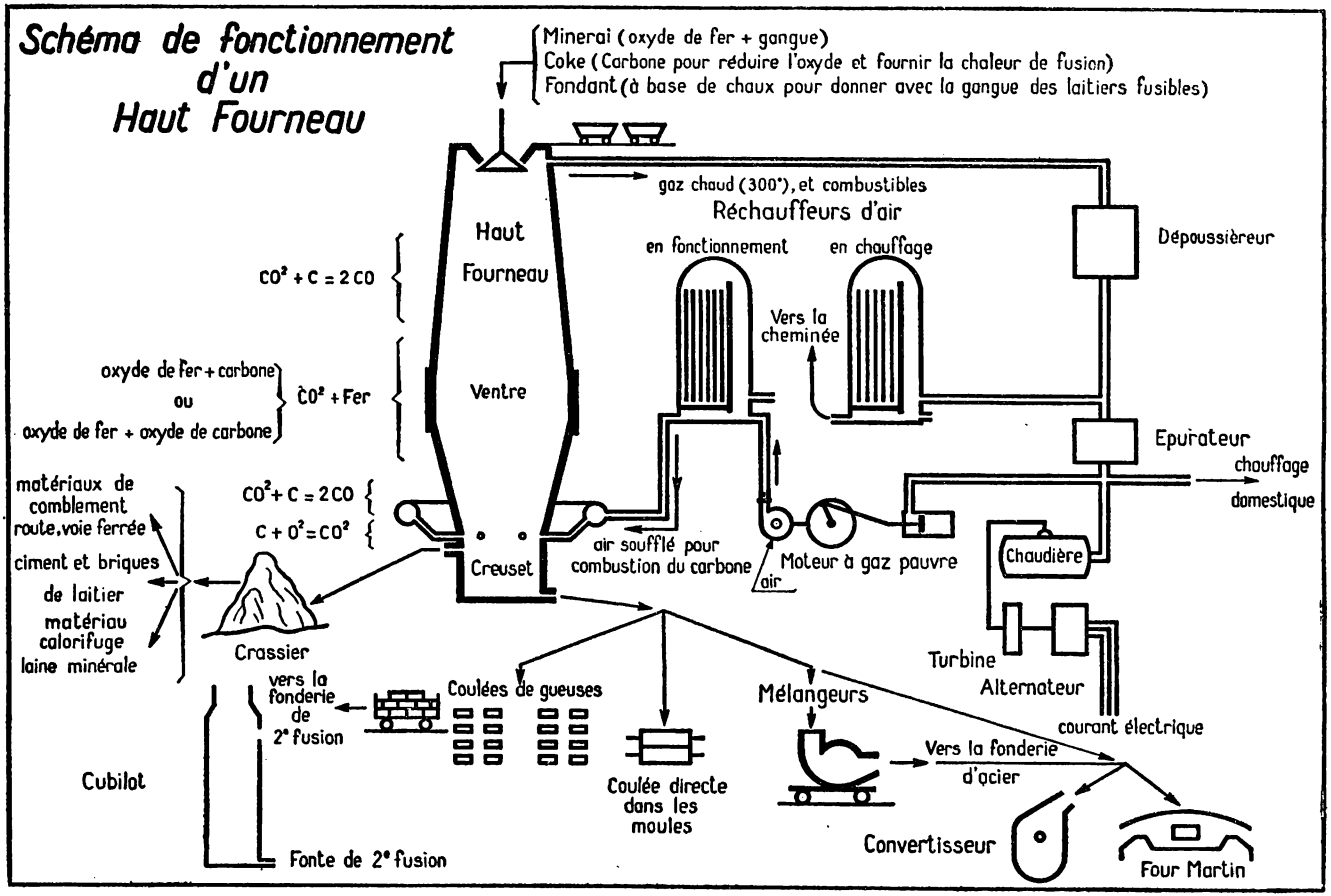


Fig. 1. — Fonctionnement d'un haut fourneau.

2° La fonte.

Lorsque le creuset est plein et que les laitiers ont été évacués, on procède à la coulée de la fonte : on débouche le trou de coulée à l'aide d'une barre d'acier que l'on enfonce dans le tampon de terre qui l'obstrue.

Comme le haut fourneau fonctionne d'une façon continue, on procède à plusieurs coulées par jour.

La fonte produite par le haut fourneau est appelée *fonte de première fusion.*

Elle a trois utilisations :

Coulée des gueuses destinées à être utilisées dans les fonderies de deuxième fusion.

Exécution de grosses pièces par coulée directe dans des moules.

Fabrication de l'acier.

a) *Coulée des gueuses.*

La coulée des gueuses se fait dans une machine à couler. Elle comprend un transporteur à godets, assez fortement incliné de façon que chaque godet se trouve disposé légèrement en dessous de celui qui le précède (voir *fig.* 1 *bis*). Ces godets ont la forme intérieure des gueuses à faces fortement dépouillées.

Quand le creuset du haut fourneau est plein, on vide son contenu de fonte liquide dans une poche. Cette poche porte à la partie inférieure un orifice dont l'obturateur peut être commandé de la cabine du pont roulant. La poche est amenée au-dessus de l'extrémité inférieure du transporteur. Le jet de fonte remplit les godets au fur et à mesure qu'ils se présentent. Pendant la marche ascendante, des tuyères envoient à la surface des godets un jet d'air destiné à chasser les pellicules d'oxyde de fer et un jet d'eau qui active la solidification du métal. Des wagons reçoivent les gueuses qui tombent d'elles-mêmes, lorsque les godets passent à la partie supérieure du transporteur et changent de direction.

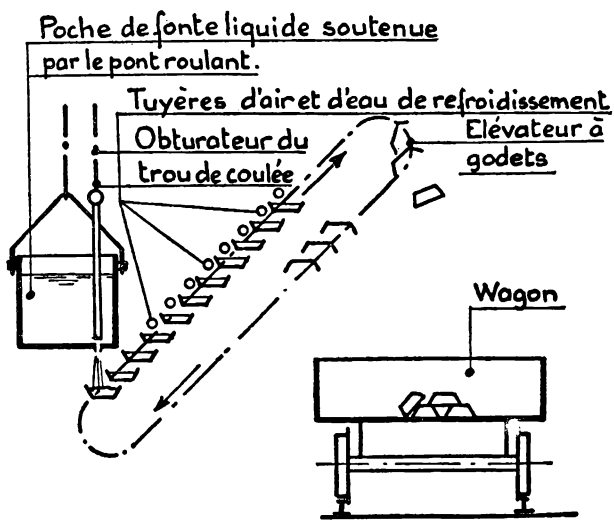


Fig. 1 *bis.* — Coulée des gueuses.

b) *Moulage de grosses pièces.*

Bien que la fonte de première fusion soit impure, qu'elle présente un grain grossier, et qu'elle soit difficile à usiner, elle peut servir à couler directement de grosses pièces ne devant pas subir beaucoup de travail à l'outil (*contrepoids, tuyaux, plaques d'égout*, etc.). Dans ce cas, la fonte, à la sortie du haut fourneau, est reçue dans de grandes poches qui sont emmenées, au moyen de wagonnets, dans l'atelier où l'on procède à la coulée des moules.

c) *Fabrication de l'acier.*

Lorsque la fonte est destinée à être transformée en acier, elle est coulée dans de grands récipients appelés *mélangeurs*. Ces mélangeurs sont montés sur des wagons et dirigés vers l'aciérie. La fonte liquide est alors introduite, après réchauffage s'il y a lieu, dans des *fours Martin* ou des *convertisseurs Bessemer* pour être transformée en acier.

3° Principales fontes de première fusion obtenues au haut fourneau.

Suivant l'allure du haut fourneau, nous avons vu que l'on obtient soit de la fonte grise, soit de la fonte blanche.

a) *Fonte grise.*

Dans la fonte grise, presque tout le carbone se trouve à l'état libre sous forme de *graphite*. Ce sont les petites paillettes noires de graphite, mélangées aux cristaux de fer, qui donnent à la cassure de la fonte une teinte grise.

La présence du silicium a favorisé la précipitation du carbone sous forme de graphite.

Une fonte grise a donc une teneur en silicium et en carbone élevée :

Si : 1,5 à 5 % ; C : 3,5 à 4,5 %.

Cette fonte sert à faire des gueuses pour les fonderies de deuxième fusion et le moulage de grosses pièces.

La fonte grise résiste mal à la traction mais, en revanche, elle offre une bonne résistance à la compression. Elle est douce, c'est-à-dire facile à travailler à l'outil. Elle fond vers 1 200° en un liquide fluide qui épouse bien la forme des moules.

b) *Fonte blanche.*

Dans la fonte blanche, tout le carbone est combiné au fer pour donner du carbure de fer, corps très dur, très fragile, dont la couleur est gris clair avec éclat métallique. Aussi la cassure de la fonte est-elle blanche, compacte, sans trace de graphite.

La fonte blanche contient peu de silicium et peu de carbone (2,3 à 3 %). Elle est très dure, très fragile et difficile à usiner.

Plus fusible que la fonte grise, elle fond à 1 160° mais reste moins longtemps fluide, ce qui rend son moulage très difficile. Elle est utilisée comme fonte d'affinage pour la fabrication de l'acier.

Elle est obtenue en haut fourneau marchant *à allure froide* (moins de coke et vent moins chaud que pour l'obtention de la fonte grise).

c) *Fonte truitée.*

La fonte truitée est intermédiaire entre la fonte grise et la fonte blanche. Le carbone est en partie combiné au fer sous forme de carbure de fer et en partie déposé dans la masse sous forme de graphite. La cassure du métal présente l'aspect de la peau d'une truite, les parties foncées riches en graphite se détachant sur un fond blanc où domine le carbure de fer.

Les fontes truitées servent à faire des pièces moulées plus résistantes que les pièces en fonte grise.

4° Les sous-produits de la fabrication de la fonte.

a) *Laitiers.*

Ce sont des silicates d'aluminium et de calcium très grossiers obtenus par l'action du fondant sur la gangue. Plus légers que la fonte, ils se rassemblent à la partie supérieure du métal en fusion et ils sont évacués par un orifice situé à la partie supérieure du creuset au fur et à mesure de leur production. Leur volume est parfois plus considérable que celui de la fonte. Aux environs de l'usine, on en fait des tas de grandes dimensions que l'on appelle « crassiers ».

Les laitiers sont utilisés :

a) **Comme matériaux de comblement,** dans la construction des routes et du ballast des voies ferrées ;

b) **Pour la préparation du ciment** et des briques de laitier ;

c) **Pour la fabrication d'un matériau calorifuge** : la laine minérale.

b) *Gaz des hauts fourneaux.*

Les gaz recueillis au-dessous du gueulard ont la composition approximative suivante : oxyde de carbone 28 à 32 % (gaz combustible) ; hydrogène et carbures d'hydrogène 4 % (gaz combustibles). Gaz carbonique 12 % (gaz non combustible), le reste en azote (gaz non combustible).

Leur température est d'environ 200° à la sortie du haut fourneau : 1 m^3 de gaz peut dégager, en brûlant, 1 000 kilocalories. Comme ils sont produits en très grande quantité, on dispose ainsi d'une source d'énergie importante.

A la sortie des hauts fourneaux, les gaz sont débarrassés de leurs poussières dans des épurateurs spéciaux.

Ils sont utilisés :

1° **Comme combustibles.**

a) *Pour porter à* 800 *ou* 900° *les briques des réchauffeurs* de l'air insufflé dans les hauts fourneaux. Les réchauffeurs fonctionnent par batteries de 2 appareils que l'on met alternativement en circuit (voir *fig.* 1) ;

b) *Pour le chauffage de l'eau dans des chaudières spéciales.* La vapeur produite est utilisée pour entraîner des turbo-alternateurs fournissant le courant consommé dans l'usine ;

c) *Pour le chauffage des fours de réchauffage* de la fonte ou des lingots d'acier ;

d) *Dans les moteurs à gaz pauvre* qui entraînent les ventilateurs des hauts fourneaux ;

e) *Pour le chauffage domestique* (les gaz sont distribués aux localités voisines de l'usine comme l'est, dans les villes, le gaz d'éclairage).

2° **Comme véhicule de calories, en raison de leur haute température** (200°).

a) *Pour réchauffer l'eau* d'alimentation des chaudières ;

b) *Pour produire de la vapeur* dans des chaudières spéciales ;

c) *Pour le chauffage de l'usine* et des habitations voisines.

D. — Affinage de la fonte. Fonte de deuxième fusion

1° Principe.

La fonte de première fusion, élaborée en haut fourneau, contient trop d'impuretés pour être utilisée à la fabrication de pièces moulées, de petites et moyennes dimensions, qui doivent posséder des caractéristiques bien déterminées et pouvoir facilement s'usiner.

Il est donc nécessaire de l'affiner, c'est-à-dire de la purifier.

Cette opération est obtenue par fusion des gueuses de fonte dans un cubilot ; le métal obtenu est la *fonte de deuxième fusion.*

Les *cubilots,* installés dans les diverses fonderies du pays, sont des fours cylindriques verticaux de 1 mètre environ de diamètre et de 6 à 8 mètres de hauteur (*fig.* 2).

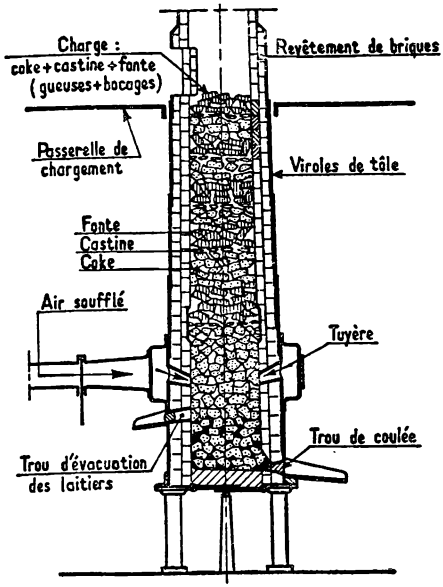


Fig. 2. — Cubilot pour production de fonte de deuxième fusion.

2° Conduite de l'opération.

Par la porte de chargement on introduit :

1° **De la fonte** :

a) fontes de première fusion, sous forme de gueuses ;

b) bocages ou fontes de récupération, provenant des pièces mécaniques cassées.

2° **Du coke** dont la combustion fournira la chaleur nécessaire à la fusion du métal.

3° **De la castine** (carbonate de calcium et de magnésium) qui donnera, avec les impuretés de la fonte, un *laitier* fusible.

L'air nécessaire à la combustion du coke est soufflé par les tuyères disposées autour du cubilot, à 1 mètre environ du bas de l'appareil.

La fonte en fusion s'accumule à la partie basse du cubilot, tandis que les laitiers qui surnagent s'écoulent par un orifice d'évacuation. Périodiquement, on débouche le trou de coulée et la fonte liquide s'écoule.

3° Différentes fontes obtenues au cubilot.

Suivant la constitution des charges introduites au cubilot, on obtient :

a) **Une fonte grise** riche en carbone (3,5 à 4 %), et en silicium (1,5 à 2,5 %), dont le carbone se trouve à l'état libre sous forme de graphite. Cette fonte est coulée directement dans des moules pour l'exécution de pièces mécaniques.

Elle peut être en partie décarburée dans les fours Martin, Bessemer ou électriques pour donner un produit plus résistant : la *fonte aciérée.*

b) **Une fonte blanche** qui contient peu de carbone, 2 à 2,5 %, peu de silicium et dont le carbone est combiné au fer sous forme de carbure de fer. Elle est obtenue par mélange de fonte grise et acier.

Cette fonte sert à la coulée de pièces de petites dimensions qui seront ensuite traitées dans des fours spéciaux afin de leur donner une plus grande

malléabilité. Le métal ainsi transformé est appelé *fonte malléable.* Pour l'obtenir, on recuit les pièces en fonte blanche au contact d'un corps riche en oxygène. Le carbone de la fonte se trouve brûlé et le métal est transformé en acier.

c) **Une fonte mécanique** à haute résistance, obtenue en mettant dans le cubilot de la fonte grise hématite et quelques riblons d'acier.

Le produit obtenu, intermédiaire entre la fonte grise et la fonte blanche, a une résistance comparable à celle de l'acier : $(R_r)_e = 250$ à 300 N/mm².

ÉLABORATION DE L'ACIER

A. — Principe de la métallurgie

L'acier peut être obtenu :

a) A partir de la fonte de première fusion élaborée en haut fourneau ;

b) A partir des déchets d'acier récupérés par les marchands de vieux métaux, vulgairement appelés ferrailleurs.

1° Fabrication de l'acier à partir de la fonte.

Une fonte de première fusion contient :

Du fer, plus 2,3 à 4,5 % de carbone, 0,5 à 5 % de silicium, 2 à 4 % de manganèse, du phosphore et des impuretés diverses.

Un acier doit, en principe, être constitué par du fer, plus 0,05 à 1,5 % de carbone, 0,2 à 1 % de silicium et 0,3 à 0,8 % de manganèse.

Pour transformer la fonte en acier, il faudra donc enlever en partie le carbone, le silicium, le manganèse, et en totalité le phosphore et les impuretés. Ce résultat sera obtenu par l'action de l'oxygène qui brûlera les corps en excès, donnant ainsi des produits volatils, évacués dans les fumées, ou des produits solides, évacués sous forme de laitiers liquides grâce à l'action d'un fondant : la chaux.

D'où les deux principales méthodes :

— action combinée de la chaux et de l'oxygène de l'air qui traverse la masse de fonte en fusion : *procédé Bessemer* ;

— action combinée de la chaux et de l'oxygène d'un oxyde de fer mélangés à la fonte maintenue en fusion : *procédé Martin.*

2° Fabrication de l'acier à partir de ferrailles.

Les ferrailles sont fondues ensemble. On prélève, après fusion complète, une éprouvette dont on fait l'analyse. Si la teneur en carbone est inférieure à celle de l'acier désiré, on ajoute de la fonte. Dans le cas contraire, une addition d'oxyde de fer permet d'oxyder le carbone en excès. De la chaux introduite dans le bain permettra d'éliminer les impuretés sous forme de laitiers.

Cette méthode d'élaboration de l'acier est appliquée au *four Martin* ou au *four électrique.*

B. — Différents procédés de fabrication des aciers

1° Procédé Bessemer.

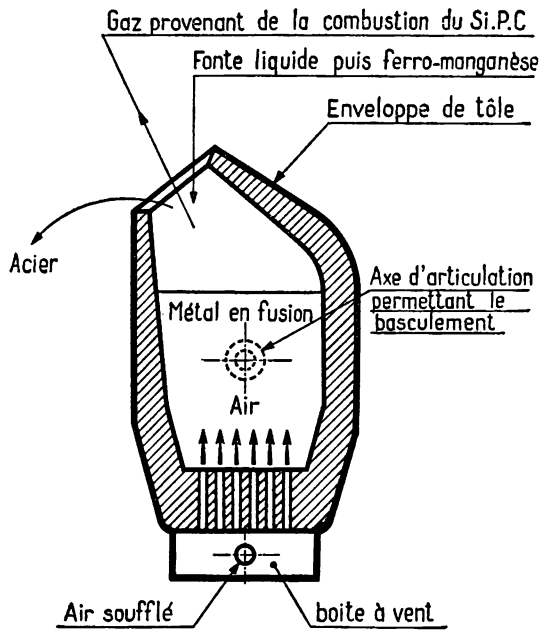


Fig. 3. — Four Bessemer.

a) ***Principe.***

Oxydation du carbone de la fonte par l'oxygène de l'air.

b) ***Four.***

Le convertisseur Bessemer (*fig.* 3) est une cornue en tôle avec revêtement intérieur en briques réfractaires à base de carbonate de calcium et de magnésium (traitement des fontes phosphoreuses : *procédé Thomas*).

Sous la partie inférieure, percée de trous, est placée une boîte à vent dans laquelle on fait arriver de l'air sous pression (p = 3 kg/cm^2 environ).

Le four peut basculer autour d'un axe de rotation pour permettre son remplissage et la coulée du métal.

c) ***Conduite d'une opération.***

La cornue étant inclinée, on charge d'abord de la chaux pure, puis de la fonte liquide. On donne du vent et on redresse l'appareil. L'air soufflé, traversant la masse de fonte en fusion, brûle d'abord le silicium, le manganèse, puis le

carbone et enfin le phosphore. Les différents stades de l'opération sont facilement reconnaissables aux couleurs des gaz qui sortent du gueulard :

Étincelles : combustion du silicium.

Flammes bleues : combustion du carbone.

Flammes rousses : combustion du phosphore.

Quand des fumées commencent à sortir, c'est le fer qui s'oxyde. On arrête alors le vent. Dans la cornue, il n'y a donc plus que du fer, un peu d'oxyde de fer et, surnageant au-dessus, les scories qui ont retenu le phosphore. Pour transformer le métal en acier il faut donc :

1° *Ajouter du carbone* ;

2° *Réduire l'oxyde de fer.*

Aussi ajoute-t-on une fonte spéciale (*ferro-manganèse*) qui contient le carbone indispensable à la transformation du fer en acier et le manganèse nécessaire à la réduction de l'oxyde de fer. Puis on donne du vent pour brûler le manganèse en excès, et on bascule la cornue pour enlever les scories et couler le métal.

L'opération complète est très rapide ; elle dure environ vingt minutes.

La chaleur nécessaire pour maintenir la masse en fusion est fournie par la combustion du silicium, du manganèse et du carbone. On traite donc par ce procédé des fontes riches en de tels corps. Un four Bessemer permet de traiter au maximum 30 tonnes d'acier. Le métal obtenu est appelé *acier Thomas.*

2° Procédé Martin.

a) *Principe.*

1° **Oxydation du carbone de la fonte** par l'oxygène de l'oxyde de fer.

2° **Fusion des aciers de récupération** et modification du pourcentage de carbone par addition, soit de fonte pour l'augmenter, soit d'oxyde de fer pour le diminuer.

Dans les deux cas, on ajoute de la chaux qui facilite la formation de laitiers fusibles et l'évacuation des impuretés, en particulier du phosphore.

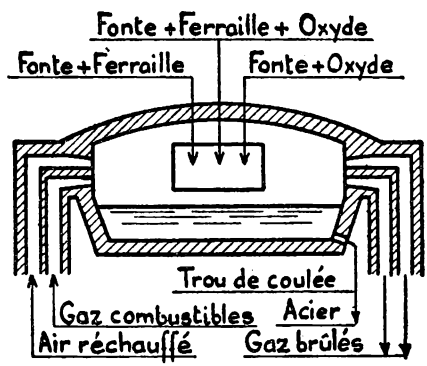


Fig. 4. — Schéma du four Martin.

b) *Fours.*

Les fours Martin (*fig.* 4) sont construits en briques réfractaires. La sole creuse permet de recevoir le métal ; la voûte cintrée a pour effet de renvoyer la chaleur sur la sole.

L'air et le gaz combustible provenant des cokeries arrivent après réchauffage par les carneaux disposés sur les côtés du four. Le courant gazeux est alternativement renversé pour utiliser judicieusement les récupérateurs de chaleur.

Les gaz enflammés fournissent la chaleur nécessaire à la fusion du métal.

Les fours Martin sont utilisés pour traiter des quantités de métal variant de 10 à 400 tonnes. Les plus gros sont à sole fixe ; les plus petits sont basculants.

c) *Conduite d'une opération.*

Les matériaux solides, fontes en gueuses, paquets de ferraille, oxyde de fer, sont chargés au moyen de pelles mécaniques. La fonte liquide est introduite au moyen de poches spéciales.

L'adjonction de chaux permet de déphosphorer le bain par la formation de laitiers fusibles.

Quand toute la masse est en fusion et que le laitier s'est rassemblé à la partie supérieure, on prélève un peu de métal pour couler une éprouvette qui est ensuite analysée. On procède alors aux *additions* jugées nécessaires (fonte ou oxyde de fer), puis, après décrassage, on coule le métal. L'opération d'affinage au four Martin est assez longue (plusieurs heures), mais elle permet d'obtenir des produits mieux dosés, donc de meilleure qualité que ceux élaborés au convertisseur.

3° Fabrication de l'acier au four à creusets.

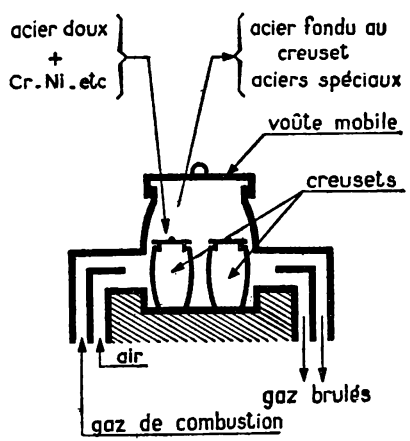


Fig. 5. — Four à creusets.

a) *Principe.*

C'est un procédé de synthèse. On fond ensemble les matériaux nécessaires à l'obtention des aciers, en s'efforçant de provoquer leur mélange intime afin d'obtenir un alliage homogène. Ce procédé, long et coûteux, n'est réservé qu'à la fabrication des aciers à outils.

b) *Conduite de l'opération.*

Les produits à fondre remplissent des creusets en graphite (*fig.* 5) qui sont chauffés dans un four par la combustion des gaz de gazogène. La fusion se produit en vase clos et, aucune oxydation ne pouvant se produire, le métal garde sa pureté. D'autre part, pour parfaire l'affinage, on peut ajouter un peu de chaux ; ainsi, toutes les impuretés seront éliminées dans le laitier qui se formera à la surface du métal en fusion.

Les matériaux peuvent être introduits solides ou liquides dans les creusets. Pour obtenir des aciers ayant un pourcentage de carbone déterminé, on fait un mélange judicieux de lingots d'acier primitivement analysés. Lorsqu'on désire élaborer des aciers spéciaux, on introduit dans le bain la quantité de métal (chrome, nickel, etc.) nécessaire. L'affinage terminé, les creusets sont retirés au moyen de pinces spéciales et on procède à la coulée.

Les aciers fabriqués par ce procédé sont vendus sous la dénomination d'aciers fondus au creuset.

4° Fabrication de l'acier au four électrique.

a) *Principe.*

L'acier peut être obtenu au four électrique :

a) **Comme au four Martin.**

— Par oxydation du carbone de la fonte au moyen d'un oxyde de fer.

— Par mélange et fusion de ferrailles et de fonte.

b) **Comme au four à creusets.**

Par mélange et fusion des matériaux nécessaires à l'obtention du produit désiré : acier et métaux d'addition.

La chaleur nécessaire à la fusion est fournie par l'électricité :

— chaleur de l'arc électrique (fours à arc) ;

— chaleur développée par le passage du courant dans la masse métallique (fours à induction).

b) *Les fours.*

Les types de fours sont nombreux. Nous nous bornerons à décrire le four à arc Héroult (*fig.* 6). Il est constitué par une cornue basculante en tôle avec revêtement intérieur en briques réfractaires. Le courant électrique arrive au niveau du bain par 2 électrodes en charbon de cornue. L'arc électrique s'amorce entre les électrodes et le métal : il fournit ainsi la chaleur nécessaire à la fusion.

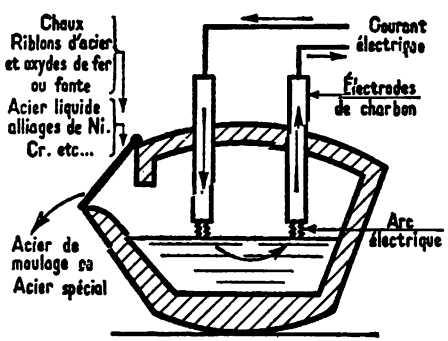


Fig. 6. — Four électrique.

c) *Conduite de l'opération.*

Les fours électriques sont utilisés, le plus souvent, pour obtenir des aciers à partir de produits déjà élaborés aux fours Martin ou Bessemer.

Les riblons et la chaux nécessaires à l'affinage sont introduits dans le four. On amorce l'arc. Quand la masse est en fusion, une éprouvette est prélevée dont le métal est analysé. On procède alors aux additions jugées nécessaires : fonte, si le bain n'est pas assez carburé, oxyde s'il l'est trop, métaux divers si l'on veut obtenir des aciers spéciaux.

Après décrassage, il ne reste plus qu'à couler.

Le fonctionnement du four électrique est automatique. Des régulateurs spéciaux permettent d'assurer la permanence de l'arc électrique par le réglage de la position des électrodes.

d) *Qualités des aciers.*

Les aciers élaborés au four électrique sont très purs car :

a) Il n'y a pas d'oxydation (travail en vase clos).

b) Il n'y a pas de perte de métal (même raison).

c) Le mélange des constituants est parfait en raison de la haute température qui peut être obtenue (près de 2 000°).

d) Le métal ne risque pas d'être souillé par les impuretés (soufre et phosphore) que pourrait apporter le combustible.

REMARQUES. — Il est à noter que les fours électriques ne sont pas seulement utilisés dans les aciéries, mais aussi par tous les fondeurs d'acier et les constructeurs qui utilisent l'acier coulé (construction automobile). La capacité des fours varie de 3 à 30 tonnes.

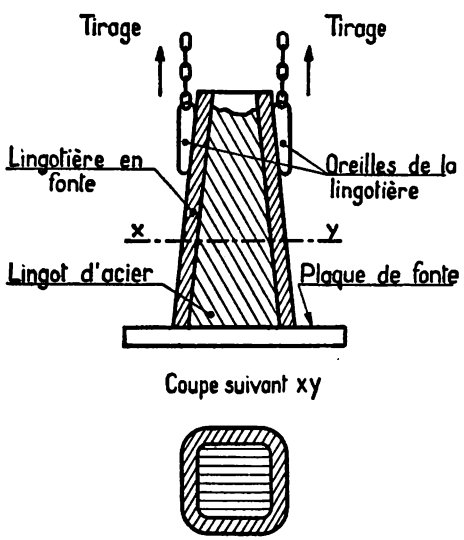


Fig. 7. — Lingotière.

5° Coulée de l'acier.

Après son élaboration, l'acier est versé soit dans des moules, soit dans des lingotières. Les *lingotières* (*fig.* 7) sont des récipients en fonte où se solidifie le métal liquide qui y est coulé. Le bloc de métal ainsi obtenu est appelé *lingot.*

Les lingotières ont la forme de troncs de pyramides à base carrée. Elles sont ouvertes aux deux extrémités et sont munies d'oreilles pour en permettre la manœuvre.

Pour diminuer l'importance de la *retassure* qui se produit au moment du refroidissement au cœur de la pièce à partir du haut, on coule souvent le métal la plus grande base en haut. On retourne ensuite la lingotière pour démouler.

Les lingots peuvent avoir des dimensions importantes (section à la base 650 × 650, hauteur 1,90 m) et peser environ 4 000 kg. Après démoulage, les lingots sont réchauffés ; ils sont ensuite passés entre les cylindres d'un puissant laminoir où ils sont étirés en barres de section rectangulaire. Les barres sont aussitôt cisaillées en différentes longueurs et les morceaux ainsi obtenus, de section et de longueur variables, prennent le nom de blooms, billettes ou largets. Ces produits semi-ouvrés seront à nouveau réchauffés et étirés dans d'autres laminoirs pour donner des barres profilées : ronds, carrés, plats, cornières, tôles, etc., ou fils (après passage dans des filières).

6° Acier corroyé.

Les aciers corroyés sont des aciers durs obtenus par le martelage, au marteau-pilon, d'aciers doux cémentés.

Cémentation des aciers doux.

On charge, dans des caisses en fonte, des barres d'acier doux plat de 80 × 15 que l'on dispose en couches horizontales séparées par 3 cm de charbon de bois (cément). On ferme hermétiquement les caisses et on les porte dans un four où elles sont maintenues à 900° pendant douze jours environ. Le carbone du cément pénètre à l'intérieur du métal et transforme l'acier doux en acier dur. Après refroidissement, les barres sont mises en paquets, chauffées au blanc soudant, puis cinglées au marteau-pilon et étirées. Cette opération a pour but de donner de l'homogénéité au métal. Si on la répète plusieurs fois, on obtient des aciers à un, deux ou trois corroyages.

L'acier dur corroyé peut être soudé à la forge. Aussi est-il utilisé pour faire des mises rapportées à l'extrémité des outils d'agriculteur, des mors d'étaux, etc.

Son prix de revient excessif a rendu son emploi de moins en moins fréquent.

Actuellement, on élabore au four électrique des aciers demi-durs, exempts de soufre et de phosphore qui peuvent se souder. Ils ont remplacé sur le marché les aciers corroyés.

Propriétés des principaux alliages ferreux

CLASSIFICATION

A. — Les fontes

Alliages ferreux contenant de 2,3 à 4,5 % de carbone.

1° Fontes de première fusion.

Les fontes de première fusion, élaborées dans le haut fourneau, comprennent :

1° **Les fontes de moulage** (grise ou blanche), destinées à fabriquer des pièces moulées ou des gueuses pour les cubilots.

2° **Les fontes d'affinage** pour four Martin ou Bessemer.

3° **Les fontes spéciales** appelées *ferro-alliages*, riches en manganèse et silicium : ferro-manganèse ou ferro-silicium.

2° Fontes de deuxième fusion.

Les fontes de deuxième fusion, élaborées au cubilot, comprennent :

1° **Les fontes mécaniques** ordinaires ou fontes grises.

2° **Les fontes blanches** destinées à fabriquer des pièces moulées dont le métal sera ensuite transformé en fonte malléable.

3° **Les fontes mécaniques** à haute résistance ou fontes aciérées.

4° **Les fontes trempées.**

B. — Les aciers

Alliages ferreux contenant moins de 1,5 % de carbone.

1° Aciers au carbone.

Contiennent du fer, du carbone, moins de 0,5 % de Si, moins de 0,8 % de Mn et quelques traces de P et de S.

2° Aciers spéciaux.

Contiennent du fer, du carbone et un ou plusieurs constituants, tels que chrome, nickel, etc.

Dans chacune de ces catégories on distingue :

1° **Les aciers de construction** qui sont élaborés :
au convertisseur Bessemer : *aciers Thomas* ; au four Martin : *aciers Martin* ;
au four électrique : *aciers électriques.*

2° **Les aciers à outils**, de fabrication plus soignée, qui sont élaborés :
au creuset : *aciers fondus au creuset* ; au four électrique : *aciers fondus électriques* ; au four à cémenter : *aciers corroyés.*

Les aciers se présentent sous la forme de produits *moulés, laminés* ou *forgés.*

LES FONTES

A. — Fonte mécanique ou fonte grise

La fonte grise contient une assez forte proportion de carbone (de 3 à 4 %) ; elle a une *teneur en silicium assez élevée* (1,5 à 2 %, rarement jusqu'à 2,5 %).

Grâce à la présence du *silicium*, le carbone de la fonte se trouve, en majeure partie, à l'état de *graphite.* C'est la présence des cristaux de graphite qui donne sa teinte grise à la cassure de la fonte.

Les fontes grises sont assez peu résistantes aux efforts de traction (130 à 150 N/mm²), mais elles peuvent supporter des efforts de compression élevés : résistance à la compression 600 à 800 N/mm². Elles se moulent très bien et s'usinent facilement. La présence du graphite explique que l'on puisse travailler la fonte à l'outil, sans lubrification.

Ces fontes, fragiles et peu malléables, ne peuvent *ni se forger, ni se laminer.*

Au refroidissement dans le moule, la surface extérieure (la *croûte*) se durcit et devient très difficile à attaquer à l'outil. Ce phénomène peut être expliqué par la formation, au moment du refroidissement rapide, de cristaux de carbure de fer Fe_3C. Comme tous les carbures, Fe_3C est très dur et cassant.

Lorsqu'on usine la pièce, il faut éviter de faire frotter les outils sur cette partie durcie. Aussi :

1° *Le dessinateur* doit prévoir une surépaisseur d'usinage de 3 mm, supérieure à l'épaisseur de la croûte.

2° *L'ouvrier* devra faire une passe d'ébauche assez épaisse pour enlever la partie durcie d'un seul coup, diminuer la vitesse de coupe (utiliser, s'il y a lieu, des outils en carbure métalliques).

B. — Fonte blanche

La fonte blanche a une faible teneur en silicium (inférieure à 1 %). De ce fait, le carbone de la fonte ne cristallise plus au refroidissement sous forme de graphite, mais s'allie au fer pour donner du carbure de fer. Sa cassure est blanche en raison de la présence des cristaux de fer et de carbure de fer.

Très dure et très fragile, la fonte blanche sert surtout à la fabrication de pièces travaillant au frottement et ne peut s'usiner qu'à l'outil en carbure, ou à la meule. Elle se transforme facilement en fonte malléable.

C. — Fonte malléable

Les pièces en fonte malléable, d'abord coulées en fonte blanche, subissent un traitement destiné à leur donner la malléabilité et la résilience des aciers.

Premier procédé : Malléable européenne à cœur blanc.

Les pièces coulées sont transformées en acier doux par l'action à chaud de l'oxygène d'un oxyde de fer qui brûle une grande partie du carbone.

Pour que l'action de l'oxygène puisse s'exercer, les pièces doivent être minces.

Ces pièces sont mises dans des caisses en fonte, bien enrobées d'oxyde de fer. Les caisses sont ensuite portées dans des fours à la température de 950° pendant 90 heures, puis refroidies lentement.

Deuxième procédé : Malléable américaine à cœur noir.

Les fontes choisies sont à faible teneur de carbone (2 à 2,5 %) et leur pourcentage de silicium est assez élevé (1 à 1,2 %).

Les pièces sont mises au contact avec des matières neutres (vieux minerai, scories broyées) dans des caisses maintenues dans des fours à la température de 875° pendant 60 à 80 heures.

Le carbone, sous l'action de ce recuit, précipite à l'état de graphite extrêmement fin et très uniformément réparti entre les cristaux de fer (nodules). Le cœur de la pièce apparaît noir. Le métal est devenu malléable.

Par ce procédé, on peut donc malléabiliser des pièces de plus forte épaisseur.

A noter que la malléable américaine n'est pas aussi résistante ni aussi malléable que les fontes obtenues par le procédé européen.

Application des fontes malléables.

Pièces de formes compliquées devant présenter résistance, malléabilité et résilience comparables à celles de l'acier doux : raccords de tuyauteries, pièces de cycles, pièces de fumisterie, etc.

D. — Fonte trempée

On appelle *fonte trempée* une fonte durcie superficiellement par un refroidissement rapide qui provoque la combinaison du carbone avec le fer (carbure de fer).

Métal employé : fonte à faible teneur en silicium.

Le moule sera métallique pour être bon conducteur de la chaleur (moulage en coquille).

E. — Fonte mécanique à haute résistance

Cette fonte, aux propriétés intermédiaires entre celles des aciers et celles des fontes grises, présente une résistance élevée (résistance à la rupture par traction : 250 à 300 N/mm²) et peut se couler facilement comme les fontes grises. On l'obtient au cubilot par mélange de fonte à basse teneur en carbone et d'acier.

Par recarburation d'acier au four électrique, on élabore une fonte à haute résistance : la *fonte aciérée.*

LES ACIERS

A. — Aciers au carbone

Tableau des principaux aciers

Échelle de dureté	Pourcentage de C	Résistance à la rupture en kgf/mm^2 ou N/mm^2 (1)	Désignation normalisée		Emplois principaux
			Classe A	Classe C et XC	
Extra-doux	0,05 à 0,2 %	+ 35 à 45 kgf/mm² soit 350 à 450 N/mm²	A 35 à A 45	C ou X C 5 à C ou X C 20	Très malléable donc : Tôles (chaudronnerie) Tubes et Fils (Métal d'apport).
Doux	0,2 à 0,3 %	45 à 55 kgf/mm² soit 450 à 550 N/mm²	A*dx* A 45 à A 55	C ou X C 20 à C ou X C 30	Profilés pour charpentes métalliques. Tôles pour serrurerie. Mécanique ordinaire.
Demi-dur	0,3 à 0,4 %	55 à 65 kgf/mm² soit 550 à 650 N/mm²	A 55 à A 65	C ou X C 30 à C ou X C 40	Moteurs et machines-outils (bonne mécanique). Outils agricoles.
Dur	0,4 à 0,5 %	65 à 75 kgf/mm² soit 650 à 750 N/mm²	A 65 à A 75	C ou X C 40 à C ou X C 50	Outils de coupe, burins, bédanes. Pièces devant avoir une grande dureté.
Extra-dur	0,5 à 0,85 %	75 à 100 kgf/mm² soit 750 à 1 000 N/mm²	A 75 à A 100	C ou X C 50 à C ou X C 85	Outils de coupe, coutellerie etc. (pièces devant avoir une grande dureté).

(1) Résistance à la rupture d'aciers à l'état recuit.

Les propriétés des aciers au carbone varient avec la teneur en carbone.

Leur densité est de 7,8. Le point de fusion des aciers varie de 1 350° à 1 450°.

Ils se travaillent bien à l'outil, sont très malléables à chaud (forge) et résistent bien aux efforts de traction, compression et cisaillement.

Il est à remarquer que :

a) Dureté et résistance à la traction augmentent avec le pourcentage de carbone.

b) Résistance au choc et malléabilité (pourcentage d'allongement) diminuent quand la teneur en carbone augmente.

C'est la résistance à la rupture qui permet de caractériser un acier.

EXEMPLE : acier $(R_r)_e = 500$ N/mm².

Cependant l'échelle de dureté des aciers a permis de les classer en aciers extra-doux, doux, 1/2 durs, durs et extra-durs. Cette désignation, très employée autrefois, est à éviter, car elle manque de précision.

B. — Aciers spéciaux

Ils sont élaborés au creuset ou au four électrique : on ajoute, à un acier au carbone, un ou plusieurs constituants : *nickel* (Ni), *chrome* (Cr), *manganèse* (Mn)-*tungstène* (W), *cobalt* (Co), *vanadium* (Va), *silicium* (Si), *molybdène* (Mo), etc.

Les constituants ainsi ajoutés apportent de sensibles modifications aux carac, téristiques mécaniques des aciers au carbone.

D'une façon générale, les propriétés des aciers se trouvent améliorées.

1° Propriétés et emplois des principaux aciers spéciaux.

a) *Aciers au nickel.*

Le nickel a pour effet d'*augmenter la résistance* à la traction et la résilience des aciers ; il *diminue* aussi la *fissilité*, c'est-à-dire l'aptitude à la propagation des fentes sous l'action de chocs répétés (application aux blindages).

Le nickel se dissout dans l'austénite et, au refroidissement, dans la ferrite, sans former de carbures. Il abaisse les températures de transformation et diminue la vitesse critique de trempe.

Ceci explique que les aciers à forte teneur en nickel sont, à l'état recuit, à structure austénitique, et que d'autres aciers contenant une teneur moyenne de nickel sont, à l'état recuit, à structure martensitique, c'est-à-dire trempés.

Le diagramme des microstructures des aciers au nickel à l'état recuit est représenté sur la *figure* 1. Il montre, par exemple, qu'à l'état recuit, c'est-

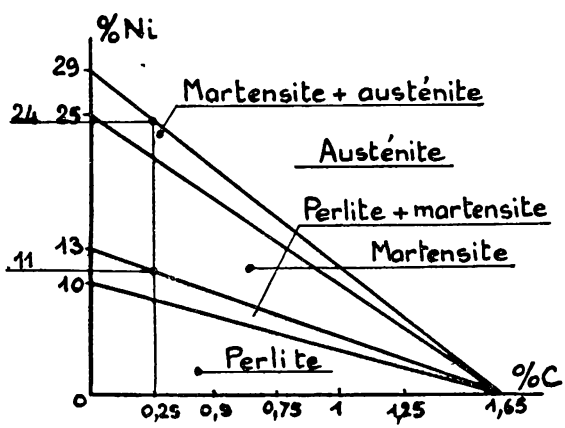


Fig. 1. — Diagramme des microstructures des aciers au nickel.

à-dire porté au-dessus de AC 3 et refroidi lentement, un acier à 0,25 % de carbone présente :

a) Les *propriétés d'un acier recuit* (structure perlitique) si la proportion de nickel varie de 0 à 11 %.

b) Les *propriétés d'un acier trempé* (structure martensitique) si la proportion de nickel varie de 11 à 24 %.

c) Les *caractères de l'austénite* (grande malléabilité, grande résilience, résistance à la rupture diminuée) si la proportion de nickel est supérieure à 24 % ; ces aciers ne peuvent pas prendre la trempe.

CLASSIFICATION DES ACIERS AU NICKEL.

On peut classer les aciers au nickel en trois catégories suivant la quantité de nickel incorporé :

a) Aciers à *faible teneur*, à structure perlitique : teneur moyenne en Ni, de 0 à 10 %.

b) Aciers à *moyenne teneur*, à structure martensitique : teneur moyenne en Ni, de 10 à 20 %.

c) Aciers à *haute teneur*, à structure austénitique : teneur en Ni supérieure à 20 %.

A) Les aciers a faible teneur : convenablement traités par la trempe et le revenu, ils ont une grande résistance à la rupture et une grande résistance au choc.

Ils peuvent supporter, sans se rompre, des efforts violents très importants. Ce sont des aciers très utilisés en matière de construction mécanique (automobiles, machines-outils, appareils de manutention, etc.).

Les propriétés de ces aciers peuvent être mises en évidence par la comparaison des caractéristiques de deux aciers, l'un à 0,25 % de C *sans nickel*, l'autre à 0,25 % de C et *à* 4 % *de nickel.*

Caractéristiques mécaniques	Acier a 0,25 % de C a l'état recuit	Acier a 0,25 % de C et 4 % de Ni a l'état recuit
Résistance à la rupture : $(R_r)_e$	480 N/mm^2	740 N/mm^2
Allongement : A %	25 %	29 %
Résilience : K	200 J/cm^2	300 J/cm^2

On voit que la présence du nickel augmente les caractéristiques $(R_r)_e$, A et K.

Si l'on avait voulu obtenir la même résistance $(R_r)_e$ avec un acier au carbone, on aurait dû choisir un acier à 0,75 % de C (*acier dur*) qui aurait eu pour caractéristiques :

$(R_r)_e$ = 740 N/mm².

Allongement A = 8 %, au lieu de 29 %.

Résilience K = 70 J/cm² au lieu de 300 J/cm².

Cet acier aurait donc été beaucoup plus fragile que l'acier au nickel.

B) Les aciers a moyenne teneur possèdent la propriété de pouvoir se tremper à l'air par simple refroidissement. Ils sont alors très résistants à la traction [$(R_r)_e$ = 1 400 N/mm²] et au choc.

Ils sont très durs, donc difficiles à usiner. Pour les travailler, on doit les recuire à 500°. Ils sont employés pour l'exécution de pièces qui doivent avoir une grande résistance : plaques de blindage de navires ou de tanks, arbres, tiges de freins, projectiles divers d'armes à feu, etc.

C) Les aciers a haute teneur.

Ils sont en général :

1° Inoxydables à l'air, très ductibles et malléables à chaud.

La trempe diminue légèrement leur résistance tout en augmentant leur malléabilité; le recuit, au contraire, les durcit.

2° Très résistants au choc.

3° Non magnétiques.

4° A coefficient de dilatation variable suivant la teneur en nickel.

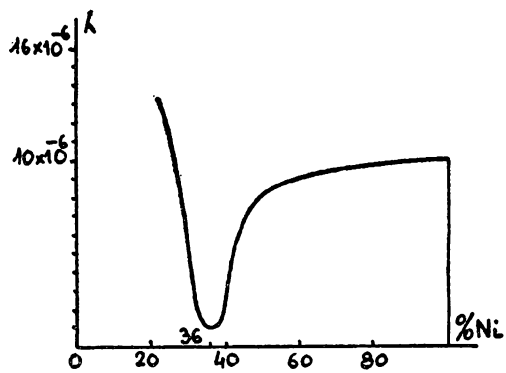


Fig. 2. — Diagramme des coefficients de dilatation λ en fonction du pourcentage de nickel.

La courbe de dilatation (*fig.* 2) présente un minimum très accusé pour une teneur voisine de 36 % (métal *invar*).

Parmi les plus employés, citons :

a) **Les aciers à 25 % de Ni** — difficiles à usiner : employés dans la fabrication des soupapes d'admission des moteurs thermiques ; des frettes d'induits des moteurs électriques ; des aubes de turbines à vapeur.

b) **Les aciers à 32 % de Ni** — possèdent une très grande malléabilité (A = 32 %).

Employés dans l'exécution de pièces devant être embouties profondément, ces aciers servent à faire également des résistances électriques (*rhéostine*).

c) **Acier à 36 % de Ni** — ou métal **invar**, dont la dilatation sous l'action des variations de température est négligeable jusqu'à 350°. Application à l'horlogerie (ressorts) et à la fabrication des appareils de mesure de précision.

d) **Acier à 46 % de Ni** — ou **platinite**, dont le coefficient de dilatation est le même que celui du verre et qui remplace le platine dans la fabrication des lampes à incandescence (traversée des connexions de la lampe dans le culot de l'ampoule).

Notons enfin qu'en raison de leur inoxydabilité, les aciers à haute teneur en nickel sont employés dans la fabrication des instruments de mesure : pieds à coulisse, jauges, palmers, calibres, cales étalons, etc. ; dans la coutellerie, dans l'industrie alimentaire, dans la brasserie et, enfin, dans la décoration (ferronnerie d'art, garnitures extérieures de magasins, garnitures intérieures de paquebots, etc.).

b) *Aciers au chrome.*

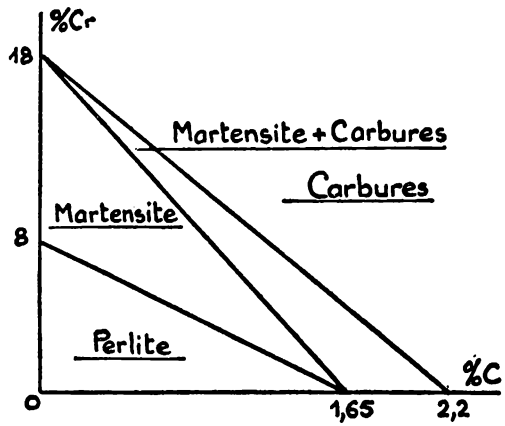


Fig. 3. — Diagramme des microstructures des aciers au chrome.

Le chrome élève les températures de transformation (environ 10° pour 1 %). Aussi accroît-il l'action pénétrante de la trempe.

Il a une grande affinité pour le carbone avec lequel il donne des carbures plus durs que la cémentite. Il augmente donc la dureté des aciers.

Le chrome accroît la résistance à la traction sans toutefois augmenter la résilience.

La microstructure des aciers est donnée sur le graphique (*fig.* 3). Les aciers à forte teneur contiennent des carbures doubles de fer et de carbone.

PRINCIPALES UTILISATIONS.

Les aciers au chrome seul sont relativement peu employés. Le chrome sert d'élément d'addition avec le nickel, le manganèse, le tungstène, etc.

On utilise cependant :

— *A*) LES ACIERS A FAIBLE TENEUR, A STRUCTURE PERLITIQUE (moins de 6 %), pour l'exécution de pièces appelées à posséder une grande dureté, sans toutefois travailler au choc : roulements à billes, outils de coupe, limes, etc.

— *B*) Les aciers a teneur moyenne, a structure martensitique (de 8 à 16 % environ). Ils sont durs et *inoxydables*. Les aciers de 11 à 13 % de chrome sont utilisés pour la fabrication d'appareils de mesure (palmers) et en coutellerie.

— *C*) Les aciers a forte teneur.

Lorsque la proportion de chrome est comprise entre 20 et 30 %, les aciers résistent bien à l'oxydation, même à haute température : application à la construction des soupapes d'échappement des moteurs à explosion, des filières de tréfilerie, etc.

c) *Aciers au nickel-chrome.*

Ces aciers ont des propriétés correspondant aux qualités des aciers au carbone modifiées par les deux éléments incorporés, c'est-à-dire : grande résistance, grande résilience, grande dureté.

Ils se trempent à l'eau, à l'huile et à l'air, suivant le pourcentage de carbone qu'ils renferment. On distingue : les aciers au nickel-chrome extra-doux, ou aciers de cémentation, doux, demi-durs, durs et extra-durs.

Ils sont utilisés en construction mécanique, dans l'industrie automobile (vilebrequins, engrenages de boîtes de vitesses, arbres droits, pièces de moteurs à grandes vitesses, arbres de turbines, etc.) et, en général, dans l'exécution de toutes les pièces qui, soumises à des efforts combinés de torsion et de flexion, doivent présenter simultanément une assez grande résistance aux chocs et à l'usure.

Lorsque le pourcentage de chrome et de nickel augmente, on obtient des *aciers inoxydables.*

Le plus employé est l'acier dit « 18-8 » (18 % de Cr, 8 % de Ni et 1 à 3 % de Mo). Cet acier, caractérisé par un grand allongement (A = 45 %) et par une résistance de 600 à 700 N/mm², ne prend pas la trempe.

Le molybdène a pour effet de diminuer la fragilité au revenu, notamment après soudure.

Cet acier inoxydable résiste bien à l'action de l'acide azotique et des acides organiques : acide acétique (vinaigre), lactique, citrique, etc.

D'où son emploi généralisé dans la fabrication des pièces et organes utilisés pour la préparation de l'acide azotique et de ses dérivés : colorants, explosifs, soie artificielle, etc. ; dans celle des pièces utilisées par l'industrie alimentaire : vinaigreries, fromageries, beurreries, brasseries, fabriques de pâtes alimentaires, distilleries, etc. (exécution de cuves, de robinets, de tuyauteries et d'organes divers).

d) *Aciers au manganèse.*

Le manganèse agit comme le nickel : il abaisse les températures de transformation et la vitesse critique de trempe.

Les aciers qui contiennent moins de 8 % de manganèse sont trop fragiles pour

être utilisés. Ceux qui comprennent de 8 à 21 % de Mn présentent une très grande résistance aux chocs et à l'usure. Leur usinage, très difficile, ne peut s'exécuter qu'avec des outils en carbure ou à la meule. Ils se coulent bien. On en fait des rails en courbe, des croisements ou pointes de cœur, des pièces d'aiguillages, des pièces de dragues, des boulets de broyeurs, des alvéoles de presses à briques, des essieux de wagons, de locomotives, etc. Le plus employé est l'acier à 12 % de Mn.

Les aciers à outil comprenant 1 % de carbone et 1,5 à 2 % de manganèse sont appelés aciers indéformables parce que, trempés à l'huile à 800°, ils ne possèdent pas de tensions internes. Ils ne se déforment donc plus après la trempe.

e) *Aciers au silicium.*

Le silicium augmente la résistance à la rupture et la contrainte de limite élastique.

Il élève les températures de transformation et diminue peu la vitesse critique de trempe : il n'améliore donc pas la trempabilité. Les aciers au silicium sont employés à la fabrication des ressorts, en raison de leurs caractéristiques élevées.

Il faut noter cependant que si la résilience est augmentée dans le sens du laminage, elle est presque nulle en travers. Pour les aciers à ressort, le pourcentage de silicium varie de 1 à 2 %.

Le silicium a, en outre, pour effet de supprimer le magnétisme *rémanent* (les tôles d'induit de dynamo sont faites en acier contenant de 1 à 3 % de Si).

f) *Aciers mangano-siliceux.*

Ces aciers ont, après trempe et revenu, une grande résistance à la rupture et une contrainte de limite élastique élevées. Ils constituent les meilleurs aciers à ressorts : application à l'industrie automobile et aux chemins de fer.

g) *Aciers au tungstène.*

Le tungstène, introduit dans les aciers, suivant une proportion allant jusqu'à 7 et 8 %, a pour effet d'augmenter, après trempe, la résistance à la rupture, la limite élastique et la dureté. Aussi les emploie-t-on dans la fabrication des outils de coupe (fraises, forets, alésoirs, tarauds, etc.) et des ressorts.

Les aciers à haute teneur en tungstène sont employés dans la fabrication des aimants, car ils conservent après trempe, d'une manière *permanente*, une induction magnétique très importante.

h) *Aciers au cobalt.*

L'emploi de ces aciers s'impose dans la fabrication des aimants permanents fonctionnant en circuit ouvert ou exposés à des influences démagnétisantes.

Applications : aimants de magnéto, tôles d'inducteurs de dynamos.

i) *Aciers à l'aluminium.*

L'aluminium, incorporé aux aciers, favorise la formation d'une couche extérieure très dure, en s'opposant à la pénétration de l'azote, au cours de la nitruration.

Les aciers à l'aluminium sont donc employés pour l'exécution des pièces devant présenter une *très grande dureté superficielle* : chemises amovibles nitrurées pour moteurs à explosion ou à combustion interne, arbres à cames, vilebrequins, axes divers, arbres soumis à de très gros efforts d'usure dus aux frottements, cages de roulements à billes, calibres et instruments de vérification à dimensions fixes, etc.

j) *Aciers à coupe rapide ou aciers rapides.*

Les aciers rapides sont des aciers spéciaux qui contiennent du chrome (maximum 6 %), du tungstène (de 14 à 22 %) et un ou plusieurs constituants : cobalt, molybdène, vanadium, titane, tantale.

Propriétés.

La densité des aciers rapides varie entre 8,5 et 9 ; la cassure du métal est grise, d'aspect très homogène, avec des grains extrêmement petits.

Ils se trempent à l'air sous pression, à l'huile, au pétrole ou au suif, mais jamais à l'eau. Pour obtenir un maximum de résistance et de résilience, la trempe doit être suivie d'un revenu à une température de 500 ou 600°, pendant 20 minutes. Le recuit des aciers rapides nécessite le maintien du métal à la température de 800° pendant 2 à 3 heures, puis un refroidissement très lent.

La dureté de ces aciers, obtenue par la trempe, reste sensiblement constante tant que la température du métal est inférieure à 600°. Cette propriété justifie l'utilisation de ces aciers pour la fabrication d'outils de coupe à grand rendement ; ils remplacent avantageusement les aciers au carbone dont la dureté diminue rapidement après 250°.

CLASSIFICATION DES ACIERS RAPIDES.

On distingue :

— les ACIERS RAPIDES ORDINAIRES A. R. O., qui contiennent de 14 à 16 % de tungstène ;

— les ACIERS RAPIDES SUPÉRIEURS A. R. S., qui contiennent de 17 à 19 % de tungstène ;

— les ACIERS RAPIDES EXTRA-SUPÉRIEURS A. R. E. S., qui contiennent, avec une grande proportion de tungstène, de 5 à 15 % de cobalt.

Les aciéries livrent sur le marché différentes nuances d'aciers rapides dont ils précisent les traitements thermiques ; il y a lieu de suivre rigoureusement les

indications données sur les catalogues des fournisseurs si l'on veut tirer de ces aciers le meilleur parti possible.

2° Composition et propriétés des principaux aciers rapides.

Nuances	Principaux constituants						Température de trempe approximative	Propriétés fondamentales
	C	Cr	W	Mo	Va	Co		
Aciers rapides ordinaires A. R. O.	0,6 à 0,8 %	4 à 5 %	14 à 16 %				1 150 à 1 200°	conservent toute leur dureté jusqu'à 400°.
Aciers rapides supérieurs A. R. S.	0,6 à 0,8 %	4 à 5 %	17 à 19 %	1 % environ	1 % environ		1 200 à 1 275°	conservent toute leur dureté jusqu'à 500°.
Aciers rapides extra-supérieurs A. R. E. S.	0,6 à 0,8 %	4 à 5 %	19 à 21 %	1 %	1 %	5 à 15 %	1 275 à 1 330°	conservent toute leur dureté jusqu'à 550°.

a) *Influence des éléments des aciers rapides.*

Le tungstène (W) donne, avec le carbone, des carbones très durs et stables qui confèrent à l'acier une grande résistance à l'usure et retardent l'adoucissement au revenu. Ceci explique la bonne tenue des aciers rapides aux températures d'échauffement élevées.

Le molybdène a des effets semblables au tungstène et peut le remplacer par moitié.

Le chrome favorise la mise en solution des carbures ; il améliore la trempabilité et augmente la dureté.

Le carbone, en teneur assez grande (en moyenne 0,75 %) permet d'obtenir une martensite particulièrement dure.

Le vanadium agit efficacement pour éviter la surchauffe.

Le cobalt, en élevant le point de fusion de l'alliage, permet d'élever la température de trempe, de rendre ses effets plus importants et plus durables à haute température.

b) *Aciers dérivés des aciers rapides.*

La pénurie de tungstène a conduit les métallurgistes à rechercher des aciers ayant des propriétés semblables à celles des aciers rapides. Ce résultat a été obtenu en substituant le molybdène à une partie du tungstène.

Voici la composition de deux de ces aciers :

	C	W	Mo	Cr	Va
1er type.....	0,75	6	5	4	1,5
2e type	0,75	2	9	4	1,5

Ces aciers sont moins coûteux ; ils ont de moins bonnes performances ; leur traitement thermique est délicat en raison des risques de décarburation et de surchauffe.

C. — Désignation normalisée des alliages ferreux

1° Fontes.

a) *Fontes grises.*

Désignation : F_t | 20

- F_t : Symbole de la fonte grise
- 20 : Résistance à la rupture à l'extension en kgf/mm^2 ou $\frac{N/mm^2}{10}$

b) *Fontes malléables.*

Désignation : MB | 35 | 10

- MB : Symbole de la fonte malléable
- 35 : Désignation de la texture
  - B à cœur blanc
  - N à cœur noir
- 10 : Allongement %
- Résistance à la rupture à l'extension en kgf/mm^2 ou $\frac{N/mm^2}{10}$

2° Aciers.

a) *Aciers non alliés.*

Ils ne comportent que du fer et du carbone.

1° **Aciers doux ordinaires,** pour serrurerie et charpente.

Désignation : Adx

2° **Aciers classe A** : aciers de construction d'usage courant ne devant subir aucun traitement thermique.

Désignation | A | 42 | SouM

- A : Symbole de classe
- 42 : Résistance à la rupture en kgf/mm^2 ou en $\frac{N/mm^2}{10}$
- SouM : éventuellement indice d'utilisation ; S = soudable. M = moulable

3° **Aciers classe C et XC** : aciers de construction spéciaux pour traitements thermiques. La nuance XC est la plus soignée.

Désignation | C ou XC | 12 | d | SouM

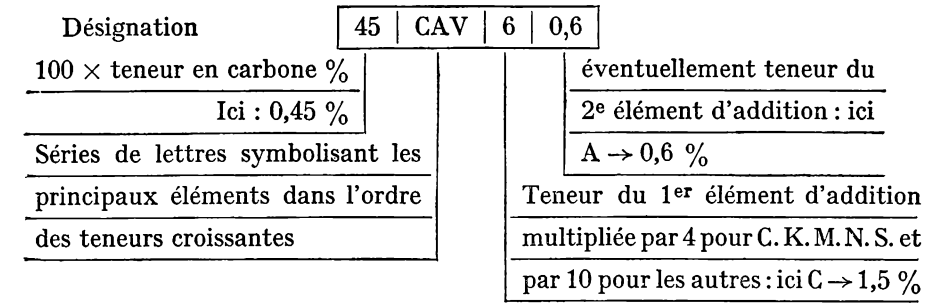
- C ou XC : Symbole de classe
- 12 : 100 × teneur en carbone % ; Ici : teneur en carbone = 0,12 %
- d : indice de pureté : *a* pureté minimum, *d* pureté moyenne, *m* pureté maximum
- SouM : éventuellement indice d'utilisation

b) *Aciers alliés.*

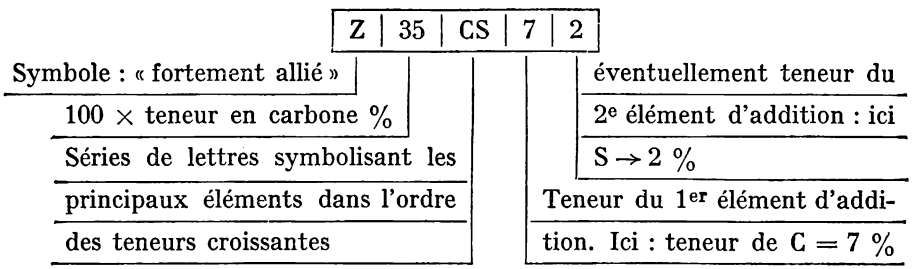
Ils contiennent des éléments d'addition introduits volontairement. Ces éléments sont désignés par une lettre :

Désignation	Symbole chimique	Symbole normalisé	Désignation	Symbole chimique	Symbole normalisé
Aluminium	Al	A	Molybdène	Mo	D
Antimoine	Sb	R	Nickel	Ni	N
Beryllium	Be	Be	Phosphore	P	P
Bore	Bo	B	Plomb	Pb	Pb
Cadmium	Cd	Cd	Silicium	Si	S
Chrome	Cr	C	Soufre	S	F
Cobalt	Co	K	Tantale	Ta	Ta
Cuivre	Cu	U	Titane	Ti	T
Étain	Sn	E	Tungstène	W	W
Fer	Fe	Fe	Vanadium	Va	V
Magnésium	Mg	G	Zinc	Zn	Z
Manganèse	Mn	M			

1° **Aciers faiblement alliés** : aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5 %.


Désignation
45 | CAV | 6 | 0,6
100 × teneur en carbone %
Ici : 0,45 %
Séries de lettres symbolisant les principaux éléments dans l'ordre des teneurs croissantes
éventuellement teneur du 2e élément d'addition : ici A → 0,6 %
Teneur du 1er élément d'addition multipliée par 4 pour C. K. M. N. S. et par 10 pour les autres : ici C → 1,5 %

2° **Aciers fortement alliés** : un élément d'addition atteint une teneur de 5 %.


Z | 35 | CS | 7 | 2
Symbole : « fortement allié »
100 × teneur en carbone %
Séries de lettres symbolisant les principaux éléments dans l'ordre des teneurs croissantes
éventuellement teneur du 2e élément d'addition : ici S → 2 %
Teneur du 1er élément d'addition. Ici : teneur de C = 7 %

◇

Forme marchande des aciers

Les aciers nécessaires à la construction de pièces mécaniques ou de charpente sont livrés sous forme de produits laminés, étirés ou tréfilés.

PRODUITS LAMINÉS

A. — Laminage

Le *laminage* est une opération qui a pour but de donner aux produits métallurgiques des profils à la demande de l'industrie.

Il consiste à faire passer les barres de métal, portées au rouge, entre des cylindres en fonte trempée dont les axes sont parallèles, qui tournent en sens inverse et constituent un *laminoir* (*fig.* 1).

Les cylindres peuvent comporter des canelures correspondant aux différents profils des barres à obtenir (*fig.* 2).

En général, pour obtenir un profil déterminé, il est nécessaire d'effectuer plusieurs passes.

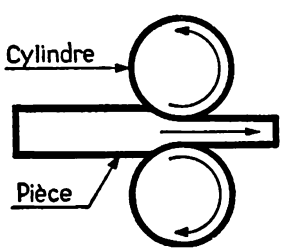


Fig. 1. — Principe du laminoir.

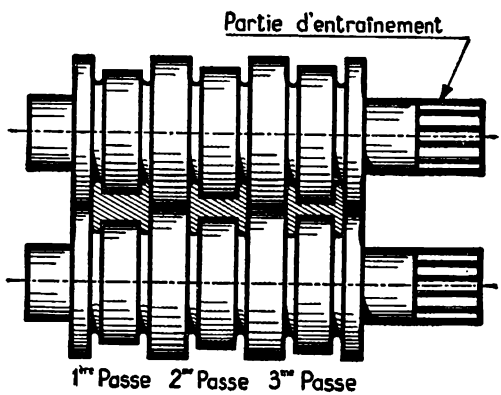


Fig. 2. — Cylindres d'un laminoir destiné à fabriquer des barres d'acier profilé.

B. — Principaux produits laminés

Ils comprennent :

— **des produits semi-ouvrés** : blooms, brames, billettes, largets ébauchés ;

— **des produits ouvrés** :

a) profilés pour construction mécanique : *ronds, carrés, plats* ;
b) profilés pour la charpente métallique : *corniéres, tés,* etc. ;
c) profilés spéciaux pour menuiserie métallique ;
d) rails ;
e) tôles ;
f) tubes ;
g) fils.

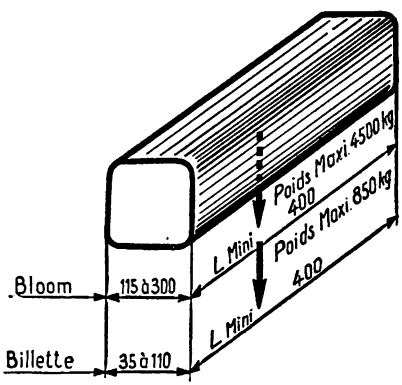


Fig. 3. — Produits semi-ouvrés : blooms et billettes.

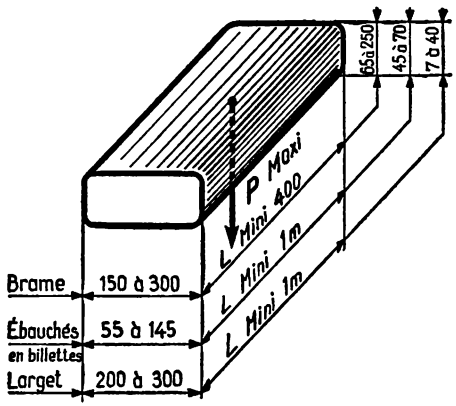


Fig. 4. — Produits semi-ouvrés : brames, billettes et largets.

1° Produits semi-ouvrés.

Après coulée du métal dans les lingotières, les lingots réchauffés passent dans un premier train de laminoirs où l'on exécute des barres de fortes sections, carrées ou rectangulaires, à angles arrondis que l'on appelle, suivant les dimensions : blooms, brames, billettes, largets (*fig.* 3 et 4).

Ces blooms et billettes sont utilisés :

a) *par l'atelier de laminage,* pour exécuter les produits ouvrés ;
b) *par les ateliers de forge,* pour façonner les pièces de grandes dimensions.

2° Produits ouvrés.

a) *Profilés pour construction mécanique.*

Ils comprennent des barres de section carrée, ronde ou rectangulaire (plat). La longueur courante des barres est de 6 mètres. Cependant, on en exécute de 8, 10, 12 mètres et, sur demande, jusqu'à 20 mètres. Les aciers spéciaux pour outillage se vendent souvent en longueur de 3 ou 4 mètres.

Les plats de très faible épaisseur sont appelés *feuillards* ; laminés sur des longueurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, ils sont livrés sous forme de bottes ovales ou de couronnes.

Exemple : feuillard de 1,5 × 30.

Les plats qui ont une grande largeur sont appelés larges-plats (largeur variant entre 0,200 m et 1,200 m ; épaisseur allant de 6 à 40 mm). Ils sont vendus en barres dont la longueur est comprise entre 2 et 6 m.

Rédaction d'un bon de commande.

Il y a lieu de spécifier :

a) La forme ;
b) Les dimensions de la section ;
c) La qualité de l'acier :
— au carbone : Thomas ou Martin ;
— spécial : préciser la composition ou les lettres-repères du catalogue de l'aciérie ;
d) La nuance de l'acier (doux, 1/2 dur, etc.), en indiquant la résistance à la rupture ;
e) La longueur qui doit être un multiple de 6 m. Si l'on désire une longueur différente de 6 m, la préciser.

Exemples :

18 m, rond Ø 30, acier Martin 1/2 dur, 600 à 650 N/mm² ;
24 m, carré de 40, acier Thomas doux, 450 à 500 N/mm² ;
12 m, plat de 8 × 50, acier 45 NC 8-2.

b) *Profilés pour charpente métallique.*

Ils comprennent :

a) **Les cornières à ailes égales et inégales.**

On les désigne par les dimensions des ailes :

Exemples : L de 60 × 60 ou L de 60 × 60 × 6.
L de 60 × 40 ou L de 60 × 40 × 5.

A chaque dimension d'aile, correspondent plusieurs épaisseurs. Une épaisseur correspond au profil normal le plus couramment employé.

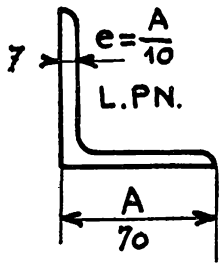


Fig. 5. — Profil cornière : profil normal ancien PN.

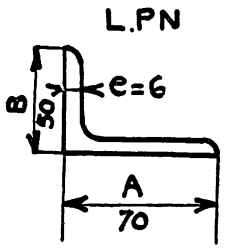


Fig. 6. — Profil cornière à ailes inégales PN.

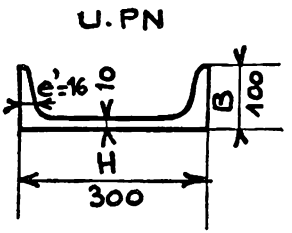


Fig. 7. — Profil U normal PN.

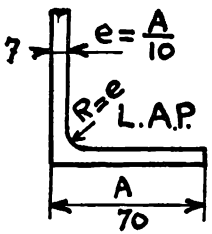


Fig. 5 *bis.* — Profil cornière : profil normalisé AP.

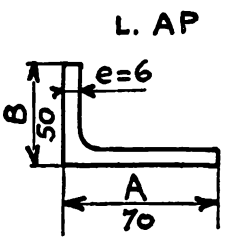


Fig. 6 *bis.* — Profil cornière à ailes inégales AP.

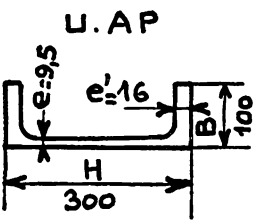


Fig. 7 *bis.* — Profil U normalisé AP.

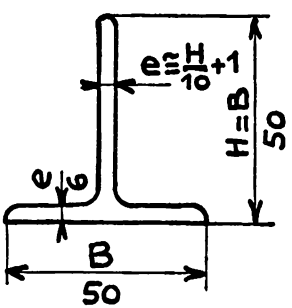


Fig. 8. — Profil en T.

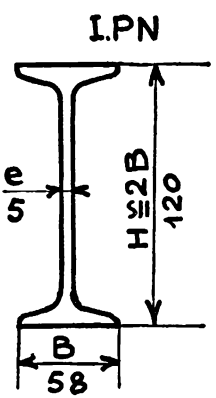


Fig. 9. — Profil I normal PN.

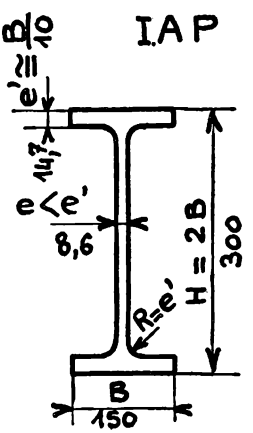


Fig. 9 *bis.* — Profil I normalisé AP.

Il existe deux profils : le profil ancien **L.** PN, en voie de disparition, à ailes à angles arrondis (*fig.* 5 et 6) ; le profil normalisé **L.** AP, à ailes à angles vifs (*fig.* 5 *bis* et 6 *bis*).

b) **Les profilés en U** ; on les désigne par la cote de hauteur.

Exemple : **U** de 120.

Il existe deux profils : le profil ancien **U.** PN (*fig.* 7), à ailes à faces inclinées ; le profil normalisé **U.** AP (*fig.* 7 *bis*), à ailes à faces parallèles.

c) **Les profilés en T** (*fig.* 8) ; on les désigne par la cote commune de hauteur et de largeur d'aile.

Exemple : **T** de 50.

Les profilés **T** *à larges ailes* qui ont une hauteur égale à la largeur des ailes.

d) **Les profilés en I.** Ils comprennent :

Les profilés normaux, utilisés pour l'exécution de planchers métalliques et de charpentes.

Il existe deux profils : le profil ancien **I.** PN, à faces obliques (*fig.* 9) ; le profil normalisé **I.** AP, à faces parallèles (*fig.* 9 *bis*).

Les profilés à larges ailes : ils ont des faces parallèles ; leur largeur est sensiblement égale à leur hauteur (voir *fig.* 10).

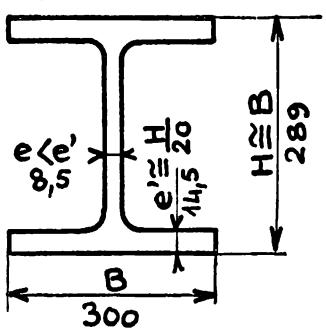


Fig. 10. — Profil **I** à larges ailes HE.

Désignation : **I.** HE de 300.

Les profilés pour charpente sont laminés en longueur courante de 6 m.

Ils peuvent être livrés en barres de 8, 10 et 12 m, mais il faut préciser, au moment de la commande, la longueur désirée.

Qualité d'acier.

Les profilés sont exécutés en acier doux Thomas, sauf pour les grandes dimensions où ils peuvent être en acier Martin.

Rédaction d'un bon de commande.

Il y a lieu de spécifier :

a) Le profil ;

b) Les dimensions caractéristiques du profil ;

c) La longueur à commander, qui doit être un multiple de 6 m. Si on désire une longueur de barre différente, il faut le préciser.

Exemples :

24 m **L** de 60 × 60.
18 m **L** de 60 × 40.
48 m **I.** AP de 120 en barres de 8 m.

c) *Profilés spéciaux pour menuiserie métallique.*

Ils ont des sections diverses représentées sur les catalogues par des numéros. Ils comprennent (*fig.* 11) :

— des *profilés pour moulure* ;
— des *mains courantes d'escalier* ;
— des *profilés pour huisserie et encadrement de fenêtres ou de portes.*

On les lamine en barres de 6 m et on les exécute en acier Thomas doux.

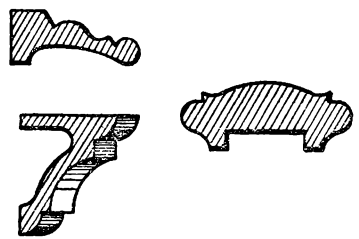


Fig. 11. — Profils spéciaux pour menuiserie métallique.

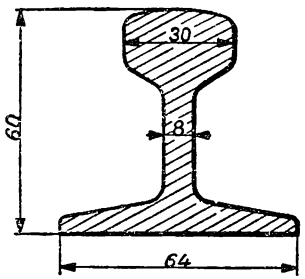


Fig. 12. — Rail.

d) *Rails.*

Les rails sont laminés suivant des profils spéciaux (*fig.* 12) :

— **Rails Vignole standard** pour voie normale.
— **Rails Vignole standard** pour voie étroite.
— **Rails Broca** pour tramway, etc.

Dans chacune des catégories, il existe différents modèles de rails correspondant à des poids différents au mètre courant.

Exemple : rail Vignole standard de 46 kg au mètre.

Les rails se font en longueurs de 12, 18 et 24 m.

e) *Tôles.*

Les tôles sont désignées par leur épaisseur : en millimètres au-dessus de 3 mm, en 1/10 de mm au-dessous de 3 mm, et en 1/100 de mm au-dessous de 1 mm.

a) **Dimensions des tôles.**

La dimension la plus courante est 1 m × 2 m. Viennent ensuite les cotes suivantes : 0,8 m × 2 m ; 1,1 m × 2,1 m ; 1,2 m × 2,2 m ; 1,3 m × 2,3 m ; 1 m × 3 m et 1,5 m × 3 m.

Pour l'exécution des chaudières, on peut laminer des tôles de 3,5 m ou 4 m de largeur et de 13 m de longueur.

Pour les tôles de forte épaisseur, le laminage peut se faire à la demande, suivant des dimensions correspondant aux besoins.

b) **État extérieur des tôles.**

Les tôles peuvent être livrées telles qu'elles sortent des laminoirs.

Certaines subissent un *dressage* à la machine ou un *planage* au marteau.

Les tôles sont dites *noires* lorsqu'elles sont recouvertes de la légère couche d'oxyde résultant de leur laminage à chaud. Pour la carrosserie, les tôles peuvent être *décapées* par immersion dans un bain d'eau acidulée. Elles ont alors un aspect blanc mat et ne nécessitent qu'un travail de ponçage réduit. Il existe des tôles à *simple* ou à *double décapage*. En outre, certaines tôles peuvent être relaminées à froid et décapées; elles sont alors blanches et parfaitement polies et peuvent être utilisées en carrosserie, sans ponçage avant peinture. Pour éviter l'oxydation profonde, certaines tôles sont laminées en paquet ou entre deux tôles; elles ont une coloration bleue, couleur de l'oxyde adhérant (*tôles bleues*).

Les symboles suivants caractérisent l'état extérieur des tôles minces pour emboutissage à froid :

NE	Tôle noire d'emboutissage.
SP	Simple décapage (*simple pickling*).
DP	Double décapage (*double pickling*).
ABO	Carrosserie ordinaire (*auto bady ordinaire*).
AB	Carrosserie extra.

c) **Qualité des tôles.**

— TÔLES D'ACIER AU CARBONE :

Tôles ordinaires, en acier doux Thomas pour les tôles de faible épaisseur; en acier Martin pour les tôles fortes.
Tôles d'acier extra-doux Martin à grand allongement pour emboutissage.
Tôles d'acier Martin demi-dur ou dur pour construction mécanique.

— TÔLES D'ACIER SPÉCIAL :

Tôles au silicium, utilisées en construction électrique.
Tôles d'acier inoxydable.
Tôles d'acier au Ni, au Cr, au W pour blindages.

La qualité d'emboutissage est caractérisée par les symboles suivants:

D T	tôle pour emboutissage ordinaire à froid, qualité Thomas Allongement A = 30 %.	
D	tôle pour emboutissage ordinaire à froid	A = 32 %.
D D	tôle pour emboutissage profond	A = 35 %.
E D D	tôle pour emboutissage extra-profond	A = 40 %.
S E D D	tôle pour emboutissage difficile	A = 43 %.

d) **Traitements thermiques.**

Les tôles minces, fortement écrouies par le laminage, sont recuites en paquet dans des caisses étanches. Les tôles plus épaisses sont recuites dans des fours.

On recuit certaines tôles (tôles de carrosserie et tôles d'acier dur) dans des fours à atmosphère réductrice (gaz d'éclairage) afin d'éviter leur oxydation. Les tôles bleues, utilisées pour l'exécution des calibres, sont des tôles d'acier dur recuites en atmosphère réductrice et relaminées à froid.

e) **Rédaction d'un bon de commande de tôle.**

Il y a lieu de spécifier :

1° La qualité.
2° L'état extérieur.
3° Les dimensions.
4° Pour les tôles moyennes et fortes, le traitement thermique, car les tôles minces, d'épaisseur inférieure à 3 mm, sont toujours livrées recuites.

Exemples :

1 tôle noire de 1 m × 2 m, épaisseur 2 mm.
1 tôle noire de 1 m × 2 m, épaisseur 4 mm recuite.
3 tôles S P E D D de 1 m × 2 m, épaisseur 15/10.

f) **Tôles galvanisées.**

Ce sont des tôles d'acier doux recouvertes d'une couche de zinc.

La galvanisation des tôles est obtenue en les plongeant, après décapage, dans un bain de zinc fondu.

Certaines tôles minces (épaisseur 7 à 8/10) sont ondulées à la presse et utilisées pour les toitures.

g) **Tôles étamées.**

Ce sont des tôles recouvertes d'étain. L'étamage est obtenu de la même façon que la galvanisation. Les tôles minces étamées sont couramment appelées *fer blanc*. Elles sont vendues emballées dans des caisses qui contiennent 56 ou 112 feuilles. Dimensions de ces tôles : 514 × 352, 514 × 704, 530 × 760.

h) **Tôles striées.**

Ce sont des tôles noires présentant, sur un côté, des surépaisseurs ayant la forme de losanges. Elles ont une épaisseur de 5 mm avec 7 mm au droit des surépaisseurs. On les utilise pour l'exécution de planchers métalliques.

f) *Tubes.*

Il en existe plusieurs catégories :

a) **Tubes soudés.**

TUBES NOIRS, QUALITÉ GAZ, SOUDÉS PAR RAPPROCHEMENT.

Ces tubes sont obtenus par roulage de bandes de tôle et liaison du joint par soudure électrique continue. Ils sont désignés par le diamètre intérieur, exprimé en fraction de pouce, ou par les deux diamètres : extérieur et intérieur, exprimés en millimètres.

Principaux tubes :

5.10 (1/8′) — 8.13 (1/4′) — 12.17 (3/8′) — 15.21 (1/2′) — 20.27 (3/4′) — 26.34 (1′) — 33.42 (1, 1/4′) — 40.49 (1, 1/2′) — 50.60 (2′).

Ces tubes sont utilisés pour les conduites de gaz, d'air, de chauffage à l'eau ou à la vapeur sous faible pression. Ils sont éprouvés à une pression de 250 N/cm² et livrés en longueurs de 4,50 m à 6 m, avec extrémité filetée au pas du tube à gaz.

Ces tubes sont assemblés au moyen de raccords et de manchons en fonte malléable.

Pour les conduites d'eau, les tubes sont livrés galvanisés.

TUBES LÉGERS SOUDÉS PAR RAPPROCHEMENT.

Ces tubes, en tôle de faible épaisseur, sont utilisés pour les constructions métalliques de meubles, échelles, tentures, etc.

Principales dimensions :

Ø extérieur.....	16	18	19	20	...	60
Épaisseur.....	1,5	1,5	1,5	1,5	...	2,8

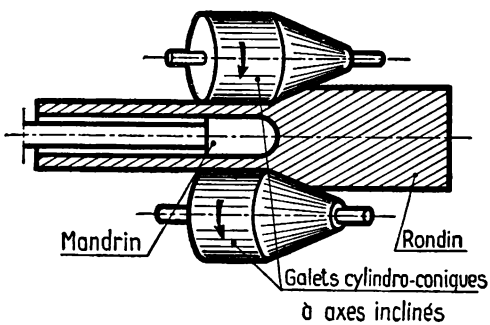


Fig. 13. — Principe de la réalisation d'un tube étiré sans soudure.

b) Tubes étirés sans soudure.

Ces tubes sont le plus souvent exécutés par laminage d'un rondin d'acier extra-doux porté au rouge (*procédé Mannesman*).

Le laminoir comprend deux galets cylindro-coniques, à axes obliques, tournant dans le même sens. Le rondin se creuse suivant son axe tandis qu'un mandrin régularise l'intérieur (*fig.* 13).

Parmi les tubes étirés sans soudure on distingue :

— LES TUBES AUX DIMENSIONS DES TUBES A GAZ.

5.10 — 8.13 — 12.17 — ... 50.60 — 60.70 — 66.76 — 72.82 — 80.90 — . 152.165.

Ces tubes sont éprouvés à la pression de 600 N/cm² et sont vendus noirs ou galvanisés.

Ils peuvent être assemblés par manchons, raccords en acier forgé, fonte malléable, ou par des brides vissées, brasées, soudées à l'autogène ou mandrinées.

Ils trouvent leur utilisation dans les canalisations hydrauliques à moyenne pression ainsi que dans les pipe-lines, pour le transport du mazout.

— TUBES SÉRIE STANDARD.

Pour chaudières tubulaires, conduites d'eau, de vapeur, surchauffeurs, serpentins divers. Ils sont assemblés par brides soudées, brasées ou mandrinées. — Longueur : 4,50 m à 6 m.

Dimensions :

Ø extérieur.	20	25	30	38	41,5	...	292	305
Épaisseur...	2	2	2,5	2,5	2,5	...	7,5	7,5

— TUBES HYDRAULIQUES A ÉPAISSEUR RENFORCÉE.

Pour presses hydrauliques, accumulateurs, etc. On les fabrique au diamètre extérieur des tubes à gaz.

Dimensions :

7. 13 — 10.17 — 13.21 — 19.27 — ... — 82.102.

Ces tubes sont essayés à la pression de 2 500 N/cm².

PRODUITS ÉTIRÉS

L'*étirage à froid* permet d'obtenir des barres, profilés et tubes ayant :

1° **Des diamètres et des épaisseurs rigoureuses** : précision 0,1 mm.

2° **Un aspect extérieur rappelant celui des aciers usinés.**

On peut donc utiliser ces produits *sans usinage extérieur*, d'où leur application pour l'exécution de pièces décolletées.

L'étirage est obtenu en faisant, *à froid*, passer dans une filière les pièces laminées (traction exercée suivant leur axe). Le métal prend la forme du trou de la filière. Sa section est diminuée, sa longueur augmentée.

BANCS D'ÉTIRAGE.

Ils comportent une tête supportant la filière, exécutée en *carbure de tungstène*. La traction sur les barres est obtenue au moyen d'un chariot entraîné par une chaîne (*fig.* 14). Étirage des tubes : un mandrin est prévu pour calibrer l'intérieur du tube.

Avant de commencer l'étirage, le bout de la barre (soie) est aplati pour lui permettre de passer dans la filière, et serré par une tenaille solidaire du chariot entraîneur.

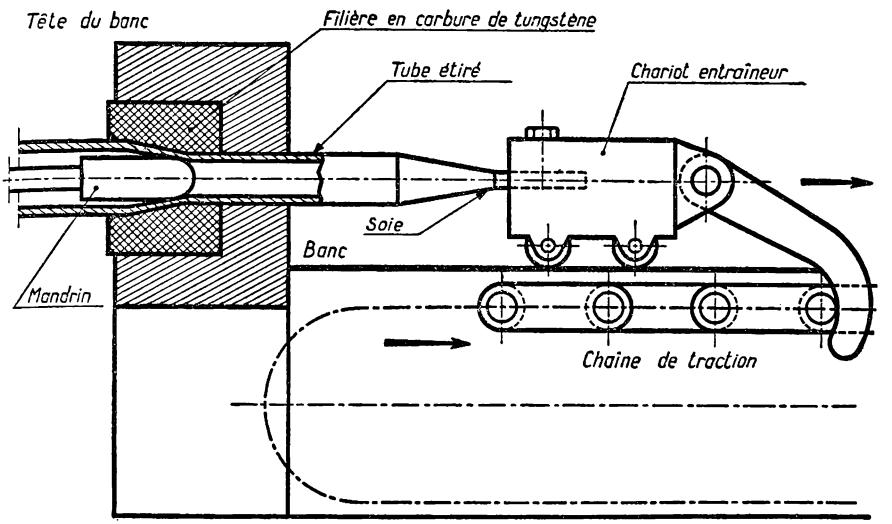


Fig. 14. — Principe d'un banc d'étirage de tubes.

L'opération d'étirage comporte :

1° **L'étirage de la soie** à chaud au marteau-pilon.

2° **Le décapage** dans un bain d'acide sulfurique étendu et chaud.

3° **Le graissage** des barres, qui diminue le frottement au passage dans la filière.

4° **L'étirage** proprement dit.

5° **Le recuit** qui supprime en partie l'écrouissage provoqué par le travail mécanique à froid.

On étire des barres profilées et des tubes en acier dur ou demi-dur en longueurs de 4 à 6 m.

ACIER STUB.

On désigne sous ce nom des barres cylindriques d'acier dur usinées sur des machines à rectifier sans pointe. Ces barres, dont la longueur est d'environ 2 m, ont un diamètre dont la cote est garantie à quelques centièmes de mm près.

Les aciers *stub* s'utilisent dans les travaux d'outillage.

PRODUITS TRÉFILÉS : FILS

Le tréfilage a pour but de transformer le métal en fil, par passage à travers une filière. C'est un procédé analogue à l'étirage. La seule différence réside dans le fait que le fil est enroulé sur un tambour à la sortie de la filière. Les fils sont livrés en rouleaux de 5 — 10 — 15 kg.

Les fils se font :

a) En *acier extra-doux recuit*, pour être utilisés comme métal d'apport de soudure autogène.

b) En *acier doux*, tels qu'ils sortent de la filière. Appelés alors *fils clairs*, ils sont fortement écrouis.

c) En *acier doux recuit*.

d) En *acier dur au carbone* : ils sont livrés écrouis (corde à piano).

e) En *acier spécial* : métal d'apport pour la soudure des aciers spéciaux, aciers à ressort, etc.

Les fils en acier peuvent être *étamés* ou *galvanisés*.

◇

Les métaux et alliages non ferreux

GÉNÉRALITÉS

Les métaux et alliages non ferreux utilisés en construction comprennent :

1° **L'aluminium et ses alliages.**

2° **Le magnésium et ses alliages.**

3° **Le cuivre et ses alliages.**

4° **Les alliages spéciaux utilisés dans la confection des outils.**

5° **Les autres métaux : zinc, plomb, étain et leurs principaux alliages.**

Désignation normalisée des métaux et des alliages non ferreux

1° Métaux non alliés.

Ils sont désignés par le symbole normalisé du métal (voir page 71) suivi d'un chiffre dont la valeur croît avec la pureté (échelonnement variable avec chaque métal). Éventuellement on indique, à la suite, un deuxième indice de pureté chimique.

EXEMPLES.

— **Aluminium** : sept qualités ont été prévues.

DÉSIGNATION	A 99	A 95	A 8	A 7	A 5	A 4	A 2
TENEUR MINIMUM EN ALUMINIUM EN %	99,99	99,95	99,8	99,7	99,5	99	Bas titre non défini. Utilisé pour l'aciérie.

— **Cuivre** : trois qualités ont été prévues.

Désignation	U 9	U 6	U 4
Teneur minimum en cuivre	99,95	99,8	99,6

INDICES DE PURETÉ CHIMIQUE.

b) (maximum 0,15 % d'oxygène, non soudable) ;
c) (maximum 0,03 % d'oxygène, soudable) ;
d) (sans oxygène).

2° Métaux alliés.

DÉSIGNATION DE COMPOSITION.

On les désigne par la lettre conventionnelle du métal de base, puis par les lettres désignant les éléments d'addition, chacune de ces lettres pouvant être suivie de la teneur arrondie à l'unité voisine.

Les éléments sont classés par teneur décroissante.

Un tiret sépare les différents éléments.

Exemples de désignation.

— **Bronze phosphoreux** U-E7-P03
Alliage de cuivre | Étain 7 % | Phosphore 0,3 %

— **Laiton de décolletage** U-Z39-Pb2
Cuivre | Zinc 39 % | Plomb 2 %

— **Alpax** A-S13
Aluminium | Silicium 13 %

— **Duralinox** A-G5-S03-M03-U01
Aluminium | Magnésium 5 % | Silicium 0,3 % | Manganèse 0,3 % | Cuivre 0,1 %

On le désigne plus simplement en ne tenant pas compte des éléments entrant dans l'alliage pour une faible teneur : A-G5.

DÉSIGNATION DU MODE D'OBTENTION ET DE LIVRAISON.

Après la désignation de composition, on peut indiquer le symbole du mode d'obtention et celui de livraison. Ces symboles sont les suivants :

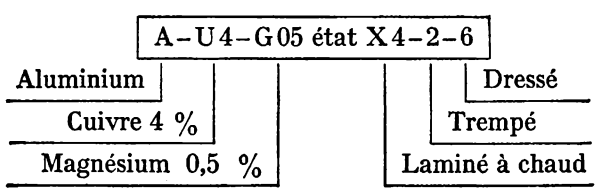
Symboles du mode d'obtention.

Métal moulé Y		Métal corroyé X	
Non défini	Y0	Non défini	X0
Lingot	Y1	Forgé	X1
Moulage en sable	Y2	Matricé, estampé, embouti	X2
Moulage en coquille	Y3	Filé à la presse	X3
Moulage sous pression	Y4	Laminé à chaud	X4
		Laminé à froid	X5
		Étiré à froid	X6
		Tréfilé à froid	X7
		Profilé à froid	X8
Selon prescriptions	Y9	Selon prescriptions	X9

Symboles de livraison.

Traitement thermique		Traitement mécanique	
Aucun traitement	0	Aucun traitement	0
Recuit	1	Écroui 1/4 dur	1
Trempé	2	Écroui 1/2 dur	2
Trempé et revenu	3	Écroui 3/4 dur	3
Trempé et vieilli	4	Écroui 4/4 dur	4
Stabilisé	5	Écroui ressort	5
		Dressé ou plané	6
		Écrouté	8
Suivant prescriptions	9	Suivant prescriptions	9

Exemple de désignation d'un duralumin.



L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

A. — L'aluminium

1° Métallurgie.

La fabrication de l'aluminium se fait en deux étapes :

a) **Fabrication de l'alumine** (oxyde d'aluminium), à partir du minerai ou *bauxite* (oxyde impur d'aluminium) extrait dans les Bouches-du-Rhône ;

b) **Fabrication de l'aluminium** par électrolyse, à partir de l'alumine, à une température voisine de 950° environ.

2° Propriétés physiques.

L'aluminium est un métal blanc, léger, de densité 2,7, dont le point de fusion atteint 658°.

Il est moins bon conducteur de la chaleur et de l'électricité que le cuivre, mais bien meilleur que l'acier.

Sa *dilatation linéaire* sous l'action de la chaleur est plus grande que celles du cuivre et des aciers. Coefficient de dilatation linéaire $\lambda = 23 \times 10^{-6}$.

3° Propriétés chimiques.

L'aluminium est *inaltérable* à l'air, grâce à la pellicule d'oxyde qui le protège, et il se conserve parfaitement dans l'eau, même à température élevée. Il est attaqué par la plupart des acides minéraux (acides chlorhydrique, sulfurique, etc.), mais il résiste bien à l'action des substances organiques : alcools, huiles, vernis, caoutchouc, glycérine, gélatine, essences, acide lactique, acides gras, etc.

4° Propriétés mécaniques.

a) *Ténacité.*

L'aluminium est peu tenace. Résistance à la rupture par traction : $(R_r)_e = 70$ à 100 N/mm².

b) *Malléabilité.*

Très grande. Allongement de rupture : 30 à 40 %. Il peut être laminé en feuilles dont l'épaisseur peut descendre jusqu'à 0,005 mm.

c) ***Ductilité.***

Très grande également ; il est possible d'obtenir des fils de toutes dimensions jusqu'à 0,03 mm.

d) ***Dureté.***

Faible ; il est rayé par la plupart des métaux.

e) ***Traitements mécaniques et thermiques.***

Sous l'action du travail mécanique à froid (laminage, martelage), l'aluminium s'écrouit et devient cassant.

Le traitement thermique, destiné à supprimer l'écrouissage, comprend une chauffe à 400°, suivie d'un refroidissement rapide dans l'eau. On l'appelle *recuit*, bien qu'il s'agisse d'une trempe.

B. — Les alliages d'aluminium

L'aluminium peut s'allier à un grand nombre de métaux. Tous les alliages sont obtenus par fusion dans des fours spéciaux.

Ces alliages peuvent être répartis en *deux groupes principaux* comprenant : ceux qui sont utilisés *sans traitement thermique* et ceux pour lesquels un *traitement thermique* permet de modifier avantageusement leurs caractéristiques.

Le traitement thermique comporte en général une *trempe* à l'eau après chauffage à une température comprise entre 500 et 550°. Parfois la trempe est suivie d'un *revenu* consistant à maintenir le métal à une température de 100 à 200°, pendant plusieurs heures.

Certains alliages peuvent être utilisés *bruts de fonderie*, sous forme de pièces moulées.

Les autres alliages sont employés, *après transformation mécanique* par laminage, filage à la presse, étirage, tréfilage ou forgeage.

Les transformations mécaniques, surtout lorsqu'elles sont faites à froid, écrouissent le métal, le rendant ainsi cassant. On peut lui redonner sa malléabilité première par un *recuit*, c'est-à-dire par un chauffage à 400° environ, suivi d'un refroidissement lent.

1° Tableau des principaux alliages d'aluminium.

Dénomination	Composition	Désignation normalisée	Résistance a la rupture en N/mm^2	Limite élastique en N/mm^2	Allongement %	Propriétés
ALLIAGES DE FONDERIE sans traitement thermique						
alliages au cuivre	Cu 8 % Cu 12 %	A-U 8 A-U 12	140 à 200 160 à 240	80 à 120 120 à 150	1 à 4 % 0,5 à 1 %	Alliages pour fabrication de carters faciles à couler. Résistance à la corrosion médiocre.
alpax	Si 13 %	A-S 13	170 à 220	70 à 90	3 à 8 %	Alliages très fluides. Bonne résistance mécanique. Bonne résistance à la corrosion. Application au moulage de carters et plaques de grandes dimensions, sous faibles épaisseurs.
alliages hypersiliciés	Si 22 % Cu 2 %	A-S 22-U 2	170 à 190	120 à 150	0,5 à 1 %	Alliages spéciaux pour pistons, présentant un très faible coefficient de dilatation.
avec traitements thermiques (trempe et revenu)						
alliages y	Cu 4 % Ni 2 % Mg 1,5 %	A-U 4-N 2-G 1, 5	240 à 300	170 à 230	0,5 à 1,5	Alliages pour pistons, culasses de moteurs. Tous les organes destinés à travailler à chaud.
alpax γ	Si 12 % Mg 0,25 % Mn 0,5 %	A-S 12-M 05	240 à 320	170 à 210	0,5 à 2 %	Alliages de haute résistance, faciles à couler. Toutes les pièces de construction mécanique.

1° Tableau des principaux alliages d'aluminium *(suite)*.

Dénomination	Composition	Désignation normalisée	Résistance à la rupture en N/mm^2	Limite élastique en N/mm^2	Allongement %	Propriétés
ALLIAGES DE FORGE ET DE LAMINAGE						
sans traitement thermique						
Duralinox H_3	Mn 0,5 % Mg 3 %	U-G 3	200 à 230	100 à 130	26 à 22	Alliages de construction, possédant de bonnes caractéristiques mécaniques, une excellente résistance à la corrosion et de grandes facilités de travail, puisqu'ils ne subissent pas de traitement thermique.
H_5	Mn 0,5 % Mg 5 %	U-G 5	300 à 400	160 à 300	26 à 18	
H_7	Mn 0,5 % Mg 7 %	U-G 7	350 à 450	180 à 350	23 à 20	
avec traitements thermiques						
Duralumin à l'état recuit	Cu 4 % Mn 0,5 % Mg 0,5 % Si 0,4 %	A-U 4-G 05	180 à 230	100 à 150	22 à 16 %	Alliages de construction pour tout ce qui concerne l'aviation, l'industrie automobile, les chemins de fer, etc.
à l'état normal : trempe et revenu.			400 à 440	250 à 300	24 à 16 %	
Almédec alliages comportant des traitements thermiques et mécaniques combinés.	Mg 0,7 % Si 0,5 % Fer < 0,3 %	A-G 07-S 05	330 à 360	240 à 270	6 à 4 %	Alliages spéciaux pour la confection de lignes électriques.

2° Duralumin.

C'est l'alliage d'aluminium qui présente le plus d'applications mécaniques. Composition : *cuivre* (Cu) 4 % ; *manganèse* (Mn) 0,5 % ; *magnésium* (Mg) 0,5 %. Sa résistance, après traitement thermique, est à peu près égale à celle de l'acier doux ; sa densité 2,8 diffère à peine de celle de l'aluminium.

Les caractéristiques maxima du duralumin sont obtenues après corroyage ou laminage à chaud et trempe. Le duralumin est alors dit *à l'état normal* : $(R_r)_e$: 400 à 440 N/mm² ; A % : 16 à 24 %.

Si l'on fait subir au métal normal un écrouissage à froid par laminage, on obtient le *duralumin dur*. Sa résistance mécanique, $(R_r)_e$ = 450 à 550 N/mm², est plus élevée qu'à l'état normal, mais sa malléabilité est de beaucoup diminuée : A % = 3 à 10 %.

Lorsque le métal dur ou normal est *recuit*, sa résistance à la rupture diminue.

TRAITEMENTS THERMIQUES.

1° **Trempe.**

Chauffage entre 480 et 500° pendant 20 minutes et refroidissement rapide dans l'eau. Le métal, mou aussitôt après la trempe, durcit progressivement. Entre la 3e et la 4e heure qui suivent, il a acquis environ 90 % de ses caractéristiques maxima ; celles-ci ne seront pratiquement atteintes qu'après 4 ou 5 jours.

On met à profit cette propriété pour le chaudronner, ou l'emboutir.

D'où les deux méthodes de travail :

1re Méthode :
- *a*) exécution des pièces, le métal étant à l'état recuit ;
- *b*) trempe de la pièce ;
- *c*) rectification de la forme des pièces.

2e Méthode :
- *a*) découpage des flans ;
- *b*) trempe des flans ;
- *c*) formage des pièces aussitôt après trempe.

2° **Recuit.**

Chauffage à la température de 350 à 400° pendant 3 à 4 heures. Refroidissement lent à l'abri de l'air.

Le duralumin garde indéfiniment cet état recuit.

3° **Fours pour traitement thermique.**

Ils doivent permettre d'obtenir une température rigoureusement constante. Les fours électriques et les fours à bain de sel avec régulation de température sont seuls employés.

C. — Applications générales de l'aluminium et de ses alliages

1° **Applieation à l'industrie des transports,** en raison de leur faible densité et de leur inoxydabilité.

— *Automobile* : carrosseries, carters, pistons.

— *Chemins de fer* : carrosseries, aménagements intérieurs.

— *Aéronautique* : construction des cellules, hélices, carters de moteurs, réservoirs à essence.

— *Constructions navales* : skiff, aménagements intérieurs.

— *Cycle* : cadres, roues de vélos.

2° **Application à l'industrie mécanique,** pour les mêmes raisons. Les alliages d'aluminium utilisés pour la fabrication des pièces en mouvement contribuent à la diminution des effets d'inertie. Exemple : poulies, bobines, navettes, hélices de ventilateurs, etc.

3° **Application à l'industrie thermique,** en raison de leur bonne conductibilité et de leur malléabilité : chaudières au gaz pour chauffage central à eau chaude, radiateurs, appareils de réfrigération ; culasses de moteurs à explosion ; tambours de freins.

4° **Application à l'industrie alimentaire,** en raison de leur résistance à l'action des composés organiques, de leur bonne conductibilité thermique et de leur malléabilité : ustensiles de cuisine, appareils pour laiteries, fromageries, fabriques de conserves et de pâtes alimentaires. Capsulage de bouteilles, emballages de chocolat, citernes pour le transport du vin, de la bière, etc.

5° **Application à l'électricité,** en raison de leur bonne conductibilité électrique. Fils et câbles, barres pour tableaux.

6° **Forme marchande des alliages d'aluminium.**

— *Pour la fonderie* : lingots de section trapézoïdale dont la masse est de 900 g, 3 kg ou 15 kg.

— *Pour le laminage et la forge* : plaques de laminage, billettes de section ronde ou carrée.

— *Pour la construction mécanique* : ronds, carrés, profilés divers, tubes, tôles, fils.

D. — Travail mécanique de l'aluminium et de ses alliages

1° Fonderie.

L'aluminium et ses alliages peuvent être très facilement *coulés,* soit dans des moules en sable vert ou des moules en sable d'étuve, soit dans des moules métalliques (moulage en coquille). Les fours utilisés sont des fours à creuset chauffés au coke, au gaz ou à l'électricité.

2° Forgeage, matriçage et estampage.

Ces opérations, tout en étant faciles à réaliser, demandent une technique spéciale, car les limites des températures de travail sont assez rapprochées (375 à

425°). Il y a lieu de surveiller la température pendant le martelage par l'utilisation d'un pyromètre à griffe. On forge des pièces de grandes dimensions, carters de moteurs d'avion, hélices, bielles de locomotives, etc.

3° Laminage.

Il est obtenu à partir de plaques coulées en coquille. Il se fait en général en deux temps : ébauchage à chaud (petit nombre de passes à 400 ou 450°), suivi d'un finissage à froid (grand nombre de passes). Le laminage de certains alliages, notamment le duralumin, est assez délicat.

4° Emboutissage et chaudronnerie.

Les alliages d'aluminium se prêtent bien à l'exécution de pièces embouties ou chaudronnées. Des recuits, en cours d'opération, peuvent être nécessaires.

Pour les alliages à traitements thermiques, l'emboutissage ou le travail au marteau doivent se faire avec du métal recuit ou venant d'être trempé.

5° Usinage.

Les alliages d'aluminium s'usinent facilement si l'on utilise comme lubrifiant du pétrole, de l'huile soluble ou de l'huile de colza.

a) *Tournage.*

a) **Outils** : ils ont la même forme que pour le travail de l'acier, mais les angles caractéristiques sont différents.

Angle de dépouille : 6° ; *angle de tranchant* : 44° ; *angle de pente d'affûtage* : 40°.

b) **Vitesse de coupe** : 150 à 200 m/mn et même davantage si le tour le permet (max. : 600 m/mn).

c) **Avance par tour** : de 2/10 à 1 mm suivant le degré de fini désiré.

b) *Fraisage.*

a) **Outils** : les fraises doivent avoir un petit nombre de dents.

Les angles caractéristiques sont les suivants :

Angle de dépouille : 6° ; *angle de pente d'affûtage* : 25 à 30°. La forme hélicoïdale des dents favorise le départ des copeaux, l'inclinaison de la denture sur l'axe étant de 25 à 30°.

b) **Vitesse de coupe** : elle peut atteindre de 100 à 600 m/mn.

c) **Avance par tour et par dent** : de 0,1 mm à 1 mm.

c) ***Perçage.***

Il s'opère avec des forets américains du type usuel, mais il est préférable d'utiliser des forets hélicoïdaux ayant un angle d'hélice de 40 à 45°. L'angle de pointe sera de 140° environ.

d) ***Sciage.***

Il peut se faire à la scie à ruban (vitesse de coupe : de 800 à 1 500 m/mn). La denture fraise aura un pas de 6 à 14 mm et une voie de 2 mm, l'épaisseur des rubans étant de 0,9 à 1 mm.

On peut utiliser également la scie circulaire à denture fraise (vitesse : 400 à 1 200 m/mn). Les scies pour le travail du bois peuvent servir au travail des alliages d'aluminium.

e) ***Limage.***

On emploie des limes à denture fraisées, rainures profondes (3 mm de largeur, inclinaison des dents sur l'axe : 70°).

6° Soudage.

a) ***Soudage oxyacétylénique.***

Le soudage au chalumeau oxyacétylénique peut être appliqué aux différents alliages, la baguette d'apport ayant, en principe, la même composition que le métal. La résistance de la soudure dépend beaucoup de l'utilisation d'un bon *flux décapant* (poudre spéciale).

Le soudage des alliages à traitement thermique est d'exécution délicate et comporte un affaiblissement des caractéristiques mécaniques en raison du recuit partiel de la zone avoisinant la soudure. Aussi les pièces en duralumin seront-elles rarement assemblées par soudage.

b) ***Soudage à l'arc électrique ou par résistance.***

On peut effectuer le *soudage à l'arc*, et surtout *par points*, des alliages d'aluminium. Il y a lieu au préalable de décaper convenablement les parties à souder.

c) ***Soudage tendre ou brasage des alliages d'aluminium.***

Il existe des *brasures* permettant l'assemblage des tôles d'aluminium sans provoquer la fusion du métal. Elles ont une résistance mécanique moins grande que les soudures.

LE MAGNÉSIUM ET SES ALLIAGES

A. — Le magnésium

1° Métallurgie.

Le *magnésium* est obtenu par électrolyse du chlorure de magnésium qui constitue le minerai appelé *dolomie* et que l'on trouve en grande quantité dans les Bouches-du-Rhône, en France.

2° Propriétés physiques.

Le magnésium est un métal blanc susceptible de prendre un vif éclat au polissage. Il est très léger (densité 1,7). Point de fusion 650°. Sa conductibilité thermique et électrique est moins bonne que celle de l'aluminium, mais meilleure que celle de l'acier.

3° Propriétés chimiques.

Le magnésium est *inaltérable à l'air sec* ; mais il se ternit peu à peu en atmosphère humide et il y a production d'une pellicule d'hydroxyde ; celle-ci n'est pas toujours suffisante pour le protéger d'une oxydation profonde, surtout s'il est en contact avec d'autres corps.

Pour protéger le magnésium et ses alliages, on procède à l'imprégnation du métal par voie chimique (utilisation de sels complexes protecteurs). Le métal est immergé pendant deux heures dans une solution d'eau bouillante et de sel. Le dépôt produit sur les pièces a une couleur jaune.

Cette opération est appelée *mordançage*. Pour protéger le métal contre les intempéries, il convient d'appliquer sur les pièces mordancées une couche de peinture à l'oxyde de titane, puis une laque.

Pour garantir le métal de l'atmosphère saline, on emploie une couche d'apprêt spécial sur laquelle on passe un vernis.

Combustion du magnésium.

Porté à son point de fusion, il peut s'enflammer et continuer à brûler dans l'air en produisant une lumière éblouissante. Le magnésium ne pourra s'enflammer que s'il est suffisamment divisé (limaille, ruban très mince) pour être facilement fondu. Le travail du magnésium peut donc s'effectuer sans danger.

B. — Les alliages de magnésium

On n'utilise en construction mécanique que des alliages de magnésium.

Les principaux corps incorporés au magnésium sont les suivants :

— L'**aluminium**, qui a pour effet d'augmenter les caractéristiques mécaniques et la fusibilité des alliages.

— Le **zinc**, qui augmente la ductilité.

— Le **manganèse**, qui améliore la résistance à la corrosion.

— Le **silicium**, qui entraîne une diminution de la dilatation thermique.

La quantité totale des produits d'addition reste inférieure à 10 %.

1° Tableau des principaux alliages de magnésium.

Alliages	État de l'alliage	Désignation normalisée	Charge de rupture en N/mm^2	Limite élastique en N/mm^2	Allongement %	Emploi des alliages
F. 1	coulé en sable	G-A6-Z3-M04	160 à 200	95 à 100	3 à 6	pièces coulées de grandes dimensions : carters.
F. 2	coulé en sable	G-A4-Z3-M04	170 à 210	90	5 à 9	pièces coulées, particulièrement résistantes : pièces d'atterrisseurs, roues de queue, etc.
F. 2	coulé en coquille		200 à 230	100	6 à 10	pièces coulées en série : petits carters, couvercles, supports divers.
F. T	coulé en sable ou en coquille avec traitement thermique	G-A8-Z3-M03	240 à 270	100 à 110	8 à 12	pièces moulées, soumises à des efforts élevés. Cet alliage nouveau présente un grand intérêt par suite de ses excellentes propriétés mécaniques.
M. 1	forgé ou filé à la presse.	G-A6-Z1,5-M04	280 à 320	200 à 220	10 à 14	pièces forgées à haute résistance : hélices, constructions en profilés et tubes.
T. 2	laminé doux	G-M2-A03-Z03	200 à 240	160 à 200	8 à 12	constructions en tôles, soudées ou rivées : capotages, réservoirs, etc.

2° Travail des alliages de magnésium.

a) *Usinage.*

L'usinage des alliages de magnésium est extrêmement facile et peut être exécuté à la plus grande vitesse de coupe des machines modernes, sans lubrification. Les angles caractéristiques des outils sont analogues à ceux des outils utilisés pour les aciers doux.

b) *Chaudronnerie.*

Le pliage et le martelage des tôles T_2 ou M_1 doit se faire à une température d'environ 300°. Il y a donc lieu, au cours du travail, de chauffer les pièces au chalumeau à gaz.

Les rayons de pliage doivent être égaux à *six fois* l'épaisseur des tôles, s'il s'agit d'un travail à froid, et à *deux fois* cette épaisseur, si l'opération s'effectue à chaud.

c) *Soudage.*

Le soudage autogène peut se faire aisément en utilisant un flux décapant spécial et des baguettes en métal approprié. Les dangers d'inflammation sont minimes. Le soudage à l'arc se fait avec atmosphère d'argon.

LE CUIVRE ET SES ALLIAGES

A. — Le cuivre

1° Métallurgie.

Le cuivre se trouve quelquefois à l'état natif, en raison de son oxydation toujours superficielle. Plus fréquemment, on le rencontre sous forme de minerai : sulfure ou carbonate. La préparation du métal comprend un *grillage* (*sulfure*) ou un *grillage* et une *réduction* (*carbonates*).

2° Propriétés physiques.

Le cuivre est un métal de couleur rouge, de densité 8,9, fondant à 1 050°. Très malléable, il peut être laminé en tôles très minces ; très ductile, il s'étire en fils dont le diamètre peut n'atteindre que quelques centièmes de mm.

Le cuivre est très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité ; après l'argent, c'est le métal qui présente la plus faible résistance électrique.

Il est assez peu tenace; résistance à la rupture : 280 N/mm².

3° Propriétés chimiques.

Le cuivre est attaqué par l'air humide et se recouvre d'une couche d'hydrocarbonate ou vert de gris, imperméable, qui protège la masse du métal contre une attaque profonde.

Tous les acides l'attaquent, même les acides organiques. D'où la nécessité de ne pas laisser séjourner les aliments dans des récipients en cuivre, car il se formerait des sels plus ou moins toxiques.

4° Travail du cuivre.

a) *Moulage.*

Le cuivre se coule très facilement, mais les pièces moulées sont peu homogènes, les soufflures étant pratiquement impossibles à éviter. Aussi n'utilise-t-on que très rarement le cuivre sous cette forme.

b) *Forgeage et laminage.*

a) **Forgeage.**

Le cuivre peut se forger et se laminer. Le forgeage du cuivre doit se faire au rouge sombre (600 à 650° maximum). Si l'on chauffe à une température plus élevée, le métal s'oxyde, la cristallisation devient grossière, et il se désagrège.

b) **Laminage et chaudronnerie.**

Le cuivre étant très malléable, il pourra se laminer et se chaudronner parfaitement. Mais il est très sensible à l'écrouissage, et on est obligé de le recuire fréquemment au cours du travail, en le chauffant au rouge sombre et en l'immergeant dans l'eau.

c) *Usinage.*

a) **Outils.**

Le cuivre se travaille très bien à l'outil.

Les outils ont les mêmes formes que pour le travail des aciers ; mais l'angle de tranchant doit être plus petit.

Les *angles caractéristiques* sont donc :

$$\widehat{a} = 6° ; \widehat{d} = 44° ; \widehat{b} = 40°.$$

b) **Vitesse de coupe.**

On adoptera une vitesse élevée : 60 à 80 m/mn.

c) **Lubrification.**

L'usinage du cuivre se fait avantageusement avec lubrification à l'huile soluble ou à l'huile de coupe.

5° Applications du cuivre.

En raison de sa bonne conductibilité électrique, le cuivre est utilisé pour la fabrication des conducteurs, fils et câbles, des pièces d'appareillage : contacts et couteaux d'interrupteur.

En raison de sa bonne conductibilité thermique, de sa grande malléabilité et de son inoxydabilité relative, le cuivre est utilisé pour l'exécution de serpentins de chauffe-eau, de chaudières, d'alambics, d'appareils de cuisine (chaudrons, casseroles), etc. En raison de sa couleur et du beau poli qu'il est susceptible de prendre, le cuivre sert encore à la décoration des appartements, des bateaux, des meubles, des appareils d'éclairage, etc.

B. — Les alliages de cuivre

Les alliages où le cuivre est l'élément principal sont :

a) Le **bronze** qui est en principe un alliage de cuivre et d'étain.

b) Les **laitons** qui sont des alliages de cuivre et de zinc.

c) Le **maillechort** qui est un alliage de cuivre, de nickel et de zinc.

1° Le bronze.

On donne dans le commerce le nom de bronze aux alliages suivants :

a) cuivre + étain.

b) cuivre + étain + un ou plusieurs métaux tels que zinc, plomb, phosphore, fer, mais en petite quantité.

c) cuivre + aluminium (bronze d'aluminium).

a) *Propriétés générales des bronzes.*

Les bronzes, de couleur jaune foncé, ont une densité de 8,6 environ et fondent à une température comprise entre 900 et 1 000°.

Bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, ils ne sont pas plus magnétiques que le cuivre.

Mais leur ténacité est plus grande : résistance à la rupture, $(R_r)_e = 350$ N/mm². Sans aucune malléabilité, ils sont assez fragiles.

b) *Propriétés chimiques.*

Les bronzes, qui ont à peu près les mêmes propriétés chimiques que le cuivre, résistent mieux aux agents atmosphériques.

c) *Classification des bronzes.*

Les bronzes peuvent être classés en quatre catégories principales :
— bronzes mécaniques ;
— bronzes pour cloches ;
— bronzes d'art ;
— bronzes d'aluminium..

a) **Bronzes mécaniques** : leur composition est très variée ; ils comprennent :

Les bronzes ordinaires contenant du cuivre et de l'étain. Jusqu'à 12 % d'étain, les caractéristiques mécaniques vont en croissant et les alliages obtenus ne prennent pas la trempe. Lorsque le pourcentage d'étain est supérieur à 12 %, leur résistance à la rupture et leur malléabilité diminuent, mais le métal devient plus dur. Une trempe à 550° diminue leur dureté, tandis qu'un recuit les durcit.

Le plus employé de ces alliages est le bronze à 90 % de cuivre et 10 % d'étain.

Ces bronzes sont utilisés pour la robinetterie, les raccords de tuyauterie, etc.

Les bronzes mécaniques spéciaux sont des bronzes ordinaires contenant en outre :

— *du fer* (moins de 2 %), qui rend le métal plus dur, plus tenace, mais moins fusible, donc plus difficile à couler ;

— *du plomb* (moins de 2 %), qui le rend plus fusible, plus dense et plus facile à usiner ;

— *du zinc* (de 2 à 4 %), qui augmente sa fusibilité ;

— *du phosphore* (de 0,1 à 0,3 %), dont l'action désoxydante permet d'obtenir un métal ayant une grande fluidité, une plus grande dureté et une notable résistance à l'usure. Les pièces dont le moulage est délicat ou qui doivent résister à l'usure (coussinets, engrenages) se fabriquent en bronze phosphoreux ;

— *du manganèse* (jusqu'à 5 %), qui donne au bronze une meilleure résistance à la rupture et une plus grande malléabilité ;

— *du nickel*, qui, tout en augmentant ses caractéristiques, permet au métal de conserver de la dureté à chaud (bagues de frottements et sièges de soupapes) ;

— *du silicium* (jusqu'à 2 %). Les bronzes au silicium, ductiles, ont une bonne résistance mécanique. Ils sont utilisés pour la fabrication de fils électriques (téléphone).

b) **Bronzes de cloches** : bronzes durs et fragiles, à haute teneur en étain ; cuivre 75 à 80 %, étain 20 à 25 %. Une trempe à 550°, dans l'eau, les rend moins durs et facilite leur usinage. Un recuit, au contraire, les durcit.

c) **Bronzes d'art** : bronzes contenant une assez forte proportion de zinc pour faciliter la coulée des pièces. Le plus couramment employé contient 84 %

de cuivre, 8 % d'étain et 8 % de zinc. En orfèvrerie, on utilise du métal renfermant jusqu'à 20 % de zinc.

d) **Bronzes d'aluminium** : de 5 à 14 % d'aluminium, avec addition de nickel, fer, silicium et manganèse.

Les bronzes qui contiennent 5 % d'aluminium peuvent être laminés à froid, à condition d'opérer un recuit entre chaque passe. De 8 à 14 %, ils peuvent être forgés et laminés à une température supérieure à 550°.

Le maximum de résilience et de malléabilité est obtenu pour des bronzes renfermant 10 % d'aluminium, lorsqu'ils ont été trempés à 500° puis revenus. Ils ont alors des caractéristiques voisines de celles de l'acier dur, mais avec une plus grande malléabilité (A % = 38 %). Résistance à la rupture $(R_r)_e$ = 750 N/mm².

Les bronzes d'aluminium sont inoxydables à chaud, difficilement attaquables par les acides, les bases et les solutions salines (eau de mer). Leur dureté à chaud se maintient jusqu'à 300°. En raison de leur inoxydabilité et de leurs hautes qualités mécaniques, on les utilise en construction aéronautique et navale : pièces pour magnéto, compresseurs, moteurs, pompes, hélices, etc.

d) *Travail du bronze.*

a) **Fonderie** : le bronze se coule très bien ; sa fusion a lieu dans des fours à creusets basculants, chauffés au coke, au mazout, au gaz ou à l'électricité.

b) **Forgeage et laminage** : si l'on excepte les bronzes d'aluminium, ils ne sont ni forgeables ni laminables.

c) **Usinage** : l'usinage du bronze nécessite certaines précautions, car le métal se dégage sous forme de grains, projetés dans toutes les directions. Les angles d'affûtage des outils sont les suivants :

dépouille $\widehat{a}$, 4 à 6° ; *pente d'affûtage* $\widehat{b}$, 0 à 4° ; *angle de tranchant* $\widehat{d}$, 80 à 84°.

Pour le *fraisage*, on utilise des fraises affûtées comme pour le travail de l'acier dur, avec une avance par dent de 0,05.

Le *perçage* s'opère avec des forets hélicoïdaux meulés sur la face d'attaque, afin d'obtenir un angle de tranchant égal à 80 ou 84° (*fig.* 1).

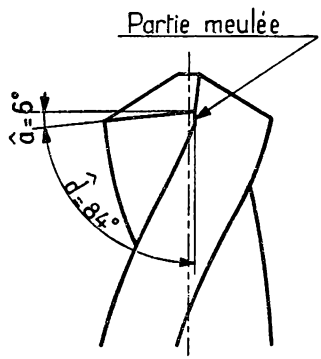


Fig. 1. — Foret pour le perçage du bronze.

On utilise également des forets spéciaux à cannelures droites.

Les vitesses de coupe utilisées pour les différents travaux sont de 50 à 80 m/mn.

Le travail du bronze se fait généralement à sec. Cependant, on peut avantageusement lubrifier à l'essence de térébenthine ou à la benzine.

2° Les laitons.

Les laitons sont des alliages de cuivre et de zinc. Le mélange de ces deux métaux pouvant se faire dans des proportions variables, il existe un grand nombre de laitons utilisés dans l'industrie.

a) *Propriétés physiques.*

Le laiton est un métal jaune clair, ce qui justifie son appellation vulgaire de cuivre jaune. Sa densité est 8,6, son point de fusion environ 950°. Bon conducteur de la chaleur, il présente une résistance électrique environ trois fois plus élevée que celle du cuivre.

Ductible et malléable (A % = 40 %), il est un peu plus résistant que le bronze : $(R_r)_e$ = 400 N/mm² environ.

b) *Propriétés chimiques.*

Elles sont identiques à celle du bronze.

c) *Principaux laitons.*

On n'utilise que les laitons contenant au minimum 55 % de cuivre car, pour des valeurs inférieures, la résistance de l'alliage n'est plus intéressante. Lorsque la proportion de cuivre est supérieure à 65 %, le métal, malléable à froid, peut s'étirer et s'emboutir. Ce sont les laitons de 1re catégorie. Lorsque cette proportion est inférieure à 65 %, le métal ne peut s'étirer qu'à chaud. Ces laitons sont dits de 2e catégorie.

D'autre part, si on incorpore à l'alliage cuivre-zinc des métaux tels que : aluminium, manganèse, étain, fer, etc., on obtient des *laitons spéciaux.*

CLASSIFICATION DES LAITONS.

1° Laitons d'étirage et d'emboutissage (de 1re catégorie).
2° Laiton de décolletage (de 2e catégorie).
3° Laitons spéciaux.

a) **Laitons d'étirage ou d'emboutissage** : ils contiennent de 67 à 70 % de cuivre et de 33 à 30 % de zinc. Ils peuvent s'étirer, se laminer et s'emboutir à froid. Cependant, comme le métal s'écrouit facilement, il y a lieu de le recuire entre chaque passe, pour lui rendre la malléabilité première. Ce recuit est obtenu en chauffant le métal entre 600 et 800°, et en laissant refroidir lentement à l'air.

Pour l'éxécution d'emboutis profonds (cartouches, douilles), on choisit un laiton très pur.

Les caractéristiques de ces laitons sont : résistance à la rupture 320 N/mm²; allongement 68 %.

b) **Laiton de décolletage** : il renferme 60 % de cuivre et 40 % de zinc. Sa résistance à la rupture est de 400 à 450 N/mm² ; A % = 38 %. Pour faciliter son

travail à l'outil, on ajoute de 1 à 2 % de plomb au mélange cuivre-zinc, ce qui rend le métal moins sec.

c) **Laitons spéciaux** : ce sont des laitons de 1re ou 2e catégorie, auxquels on incorpore de l'aluminium jusqu'à 3 %, du manganèse 2 %, de l'étain 2 %. Ces corps, qui rendent le métal plus tenace et plus résistant à l'eau de mer, sont très employés dans les constructions navales.

d) **Métal Delta** : c'est un laiton spécial contenant environ 55 % de cuivre, du zinc, 3 à 4 % de fer et du manganèse jusqu'à 10 %. Il peut se couler et se forger à une température de 600°, possède de bonnes caractéristiques mécaniques [$(R_r)_e$ = de 400 à 600 N/mm²] et résiste très bien à l'eau de mer. D'où son emploi dans les constructions navales : hélices, engrenages, pompes, etc. Notons qu'on utilise cet alliage pour la fabrication de ressorts plats.

d) *Applications générales du laiton.*

Le laiton est utilisé :

a) **En électricité,** en raison de son inoxydabilité, de sa résistance mécanique et, surtout, parce qu'il peut être raccordé avec les fils de cuivre sans qu'il se produise de couple électrique risquant d'entraîner la corrosion des pièces en contact : pièces décolletées (visserie) ou embouties pour l'appareillage.

b) **Pour la construction d'appareils thermiques,** en raison de son inoxydabilité, de sa malléabilité et de sa bonne conductibilité thermique : chaudières, serpentins, chauffe-eau, etc.

c) **Pour la robinetterie,** en raison de son inoxydabilité et de sa facilité de moulage.

d) **Pour la décoration des appartements** : des bureaux, des bateaux, en raison de son inoxydabilité.

e) **Pour certaines pièces mécaniques** susceptibles de s'oxyder: pompes, hélices, etc.

f) **Pour la fabrication des instruments de mesure, d'optique, et de lunetterie.**

e) *Travail du laiton.*

Le laiton se coule, se lamine et se forge. Il se chaudronne, se repousse et s'emboutit très bien.

L'usinage s'opère dans les mêmes conditions que celui du bronze.

Formes marchandes.

Les laitons sont vendus :

Sous forme de produits moulés.

Sous forme de produits laminés :

— barres de section carrée, plate, hexagonale, ronde,
— profilés de sections identiques à celles des aciers.
— tubes,
— tôles.

3° Le maillechort.

a) *Propriétés.*

C'est un alliage de composition approximative suivante : 60 % de cuivre 15 % de zinc et 25 % de nickel. Jaune très clair, il peut prendre un beau poli et bien résister à l'oxydation.

Il est malléable, ductile et bon conducteur de la chaleur. Il présente une grande résistance au passage du courant électrique.

b) *Applications générales du maillechort.*

a) En raison de sa résistance électrique, il est utilisé sous forme de fils pour la construction de rhéostats. Suivant la teneur en nickel, la résistivité du métal change. Il y a donc lieu, quand on achète du fil de maillechort, de préciser la résistivité désirée. Les différents maillechorts sont appelés par les fabricants : nickeline, rhéostine, etc.

b) Il est employé dans l'industrie d'optique en raison de son inoxydabilité, et aussi pour la fabrication d'instruments de mesure ou de dessin (compas).

c) *Travail du maillechort.*

Il se travaille comme le laiton.

d) *Forme marchande.*

Le maillechort est vendu en fils, barres, profilés et bandes de tôle.

ALLIAGES SPÉCIAUX UTILISÉS DANS LA CONFECTION DES OUTILS

Les alliages utilisés pour confectionner les outils de coupe sont le *stellite* et les *carbures métalliques,* dont les propriétés ne sont pas modifiées par des traitements thermiques.

A. — Le stellite

1° Propriétés.

Le stellite, *élaboré au four électrique,* est un alliage de *cobalt, chrome* et *tungstène* sensiblement de composition suivante : cobalt 55 %, chrome 33 %, tungstène 10 %, carbone 2 %.

C'est un alliage blanc gris, de densité 8,6 ; point de fusion 1 280° ; coefficient de dilatation égal à celui de l'acier.

Il possède une grande dureté, comparable à celle des aciers trempés, et la conserve jusqu'à 700° environ, température pour laquelle l'acier rapide perd son pouvoir coupant. Il est insensible aux traitements thermiques, trempe et recuit.

Ces différentes propriétés expliquent son utilisation pour la confection d'outils qu'on ne réalise d'ailleurs pas entièrement en stellite : les outils de coupe, bords de matrices, poinçons, becs de bennes d'excavateurs et, généralement, toutes les pièces travaillant à l'usure, peuvent être recouvertes d'une couche de stellite déposée au chalumeau oxyacétylénique. Pour fabriquer un outil de tour, on utilise un support en acier demi-dur (*fig.* 2), à l'extrémité duquel on dépose une couche de 1 mm de stellite ; on meule ensuite l'alliage de façon à obtenir les angles convenables.

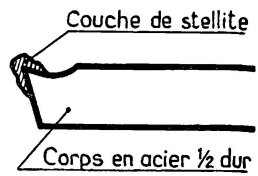


Fig. 2. — **Outil stellité.**

Cet alliage peut prendre à la meule un beau poli, ce qui améliore le coefficient de frottement et augmente sa résistance à l'usure.

D'autre part, très sensible aux variations brusques de température, il se crique facilement. Aussi, lorsqu'il est utilisé comme outil de coupe, faut-il avoir la précaution d'arroser abondamment pendant tout le travail et de ne jamais commencer l'arrosage quand une passe est en cours d'exécution.

Les outils en stellite ont, au moindre broutement, l'inconvénient de s'effriter bien plus facilement que les outils en carbures métalliques. Ceci explique pourquoi ces derniers ont été substitués au stellite pour l'exécution des outils de coupe.

2° Applications générales du stellite.

Il est utilisé sous forme de dépôt sur toutes les parties actives des pièces travaillant au frottement : outils de coupe, rouleaux de concasseurs, becs de bennes d'excavateurs, outils de perforeuses, de défonceuses de macadam, etc. D'autre part, en raison de sa résistance à la corrosion à haute température et de sa dureté il sert à recharger des sièges de soupapes (moteurs à explosion).

Les outils stellités doivent présenter des angles caractéristiques identiques à ceux des outils en acier rapide. La vitesse de coupe peut être sensiblement augmentée.

3° Travail du stellite.

Cet alliage se moule bien.

Il ne peut se forger. Son usinage se fait exclusivement à la meule ; pour éviter le criquage en cours d'affûtage, on choisit une meule tendre et on effectue de très faibles passes.

B. — Les carbures métalliques

1° Propriétés.

Les carbures métalliques ne sont pas des alliages, mais des *agglomérés* de *cobalt* et de carbures divers (*tungstène, tantale, titane, bore*), obtenus par un traitement thermique spécial appelé *frittage.*

Le mélange de carbures est d'abord broyé, puis mélangé à de la poudre de cobalt, comprimé à 40 000 N/cm² dans un moule et cuit à 850° en atmosphère d'hydrogène. Le bloc, ainsi obtenu, est ensuite fritté, c'est-à-dire chauffé entre 1 400 et 1 500°. Le cobalt, qui sert de liant, entre seul en fusion et il se produit une sorte de vitrification de l'ensemble qui doit être refroidi à vitesse convenable.

Les carbures métalliques, de couleur gris métallique, ont une densité de **14,6.** Ils ont une grande dureté, voisine de celle du diamant, donc largement supérieure à celle des aciers rapides trempés et même du stellite.

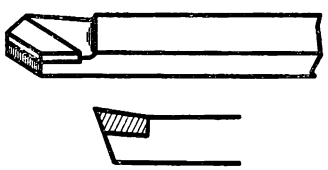


Fig. 3. — Outil à pastille rapportée en carbure métallique.

Ils conservent leur dureté jusqu'à des températures s'élevant environ à 1 000°. Aussi a-t-on pu les utiliser pour confectionner la partie active des outils de coupe, ou des outils travaillant au frottement (filières des bancs d'étirage). Assez fragiles, ils sont très sensibles aux différences de température qui risquent de provoquer des criques.

Les outils de coupe sont constitués par des pastilles de carbures, brasées à l'extrémité de barreaux en acier demi-dur (*fig.* 3).

2° Principaux carbures.

Il existe, à l'heure actuelle, plusieurs qualités de carbures métalliques dont les emplois sont nettement différents.

a) *Travail de l'acier.*

a) **Carbures très durs pour travaux de superfinition,** à vitesse de coupe très élevée, pour remplacer l'outil à pointe de diamant.

b) **Carbures pour travaux de finition** avec vitesse de coupe élevée, serrages supérieurs à 1 mm, et travaillant sans choc avec des machines-outils modernes.

c) **Carbures moins fragiles,** vitesse moyenne, pouvant résister aux chocs résultant d'une coupe interrompue et être utilisés sur machine-outil ancienne.

d) **Carbures tenaces** pour travaux de dégrossissage à fortes passes et avec chocs.

b) ***Pour le travail des fontes, bronzes et matières non métalliques.***

a) **Carbures pour fontes douces,** cuivre, laiton, aluminium, etc.

b) **Carbures pour fontes dures,** le verre, la porcelaine, la pierre.

c) **Carbures pour fontes spéciales** trempées, les plus dures.

Ces différentes nuances d'agglomérés pour outils sont obtenues en faisant varier le pourcentage de cobalt et la nature des carbures.

Les carbures sont vendus par les différents constructeurs sous les noms de : Carboram, Widia, Diamolyb, YFA, etc.

3° Applications générales des carbures.

Les carbures peuvent être utilisés pour confectionner la partie active des outils travaillant par frottement : filières pour bancs de tréfilage ou d'étirage, mises rapportées pour outils de tour, fraises ou forets.

Employés pour la coupe des métaux, ils ont permis d'adopter des vitesses de coupe au moins 3 fois supérieures à celles que peuvent admettre des outils en acier rapide, ce qui a nécessité la construction de machines-outils plus rapides.

Les outils en carbure avec lesquels le travail peut se faire à sec, ou sous lubrification abondante continue, présentent un angle de tranchant plus grand que celui des outils en aciers rapides.

4° Travail des carbures.

Les carbures métalliques ne peuvent ni se forger ni se travailler à l'outil. Ils s'usinent seulement sur des meules spéciales dont l'abrasif est le carbure de silicium, ou le diamant. L'affûtage avec un arrosage abondant est recommandable.

MÉTAUX DIVERS, ZINC, PLOMB, ÉTAIN, ET LEURS ALLIAGES

A. — Le zinc

1° Métallurgie.

On trouve dans la nature des sulfures de zinc (*blendes*) très abondants en Belgique (Vieille-Montagne), en Espagne et en Angleterre. Par grillage des sulfures et réduction de l'oxyde, on obtient le métal pur.

2° Propriétés.

Métal gris bleuâtre dont la densité est de 7,2, le zinc fond à 420° et bout à 900°.

Peu oxydable à l'air, il est, par contre, facilement attaquable par la plupart des acides.

De résistance mécanique peu élevée, il est assez malléable, surtout entre 100 et 150°. Il peut se couler facilement dans des moules métalliques.

3° Applications générales du zinc.

Surtout utilisé en feuilles minces, il sert, en raison de son inoxydabilité, à la confection de toitures, de chéneaux, de tuyaux de descente des eaux, de récipients pour l'eau : seaux, arrosoirs, etc.

L'oxyde de zinc (blanc de zinc) s'utilise pour la fabrication des peintures.

Le zinc peut être déposé en mince pellicule sur l'acier pour le protéger contre l'oxydation : tôles d'acier galvanisé. Le dépôt a lieu par voie électrolytique, par immersion de l'acier décapé dans un bain de zinc fondu, ou par condensation de vapeurs de zinc obtenues en chauffant la pièce recouverte de poudre métallique (shérardisation). Il est à noter que l'on n'utilise pas le zinc pour la fabrication d'ustensiles de cuisine ou de boîtes de conserves, car il est attaqué par les acides organiques. De nombreuses statuettes, bon marché, sont coulées en coquille avec des alliages à fort pourcentage de zinc.

4° Travail du zinc.

Le zinc s'usine très bien à l'outil et se chaudronne sans difficulté. L'assemblage des tôles est obtenu par agrafage et soudage à l'étain.

B. — Le plomb

1° Métallurgie.

On trouve le plomb dans la nature sous forme de sulfure (*galène*). Après grillage et réduction de l'oxyde, on obtient le métal pur.

2° Propriétés.

Métal gris bleuâtre, de densité 11,4, il fond à 330°. Au contact de l'air il s'oxyde, mais la mince couche d'oxyde empêche l'attaque de se développer en profondeur. Il n'est attaqué ni par l'acide chlorhydrique, ni par l'acide sulfurique.

De résistance mécanique et de dureté très faible, il est très malléable à froid. Enfin, il se laisse difficilement traverser par les rayons X.

3° Applications générales.

Le plomb est vendu sous forme de feuilles et de tuyaux.

Les feuilles s'utilisent comme revêtement dans la construction des toitures, pour la fabrication des bacs destinés aux usines de produits chimiques, pour la confection de joints assurant l'étanchéité des robinets, des presse-garnitures, etc., et pour le revêtement des murs des salles de radiologie.

Les tuyauteries de distribution de gaz, d'eau, de produits chimiques sont généralement en plomb.

4° Travail du plomb.

Très malléable, il se travaille parfaitement à froid, au maillet.

Il se soude très bien à la lampe, ou au chalumeau oxyacétylénique.

C. — L'étain

1° Métallurgie.

L'étain se trouve dans la nature à l'état d'oxydes, surtout en Malaisie et en Birmanie.

La réduction de l'oxyde permet d'obtenir le métal pur.

2° Propriétés.

C'est un métal blanc brillant, de densité 7,3. Il fond à 235°.

Inoxydable et très malléable, il peut être laminé en feuilles très minces (épaisseur inférieure à $\frac{1}{10}$ de mm).

3° Applications générales.

En raison de sa malléabilité et de son inoxydabilité, l'étain sert à la fabrication d'objets d'art : poteries, coffrets, boîtes en étain repoussé. Il s'emploie également à l'état de feuilles minces pour l'emballage de denrées alimentaires concurremment avec l'aluminium (chocolat, bonbons, etc.).

Déposé en mince couche sur l'acier, il le rend inoxydable et propice à la confection d'objets utilisés pour la cuisson et la conservation des aliments (ustensiles de cuisine étamés, boîtes de conserves en fer-blanc). L'étamage est obtenu par immersion, dans un bain d'étain fondu, après décapage, des objets en fonte, en acier, en cuivre, en laiton, en bronze.

D. — Les alliages à base de zinc, de plomb et d'étain

En dehors des alliages à base de cuivre, où ils sont incorporés en proportion variable, ces différents métaux entrent dans la composition des alliages utilisés pour le soudage, des alliages blancs employés à la fabrication des plaques modèles et des antifrictions ou régules.

1° Alliages pour soudures tendres.

Les alliages pour soudures sont des alliages de plomb (Pb) et d'étain (Sn) dont les plus employés ont les compositions suivantes :

Soudure des plombiers — Point de fusion : 220°. Pb : 67 %. Sn : 33 %.

Soudure des électriciens — Point de fusion : 182°. Pb : 37 %. Sn : 63 %.

Soudure des ferblantiers — Point de fusion : 170°. Pb : 33 %. Sn : 67 %.

On les vend sous forme de baguettes ou de fils.

2° Alliages antifrictions.

a) *Propriétés.*

Les alliages antifrictions, composés de plomb, d'étain et d'antimoine, sont encore appelés *régules* ; il en existe *deux sortes*, suivant que le plomb ou l'étain domine.

Composition moyenne des premiers : plomb 73 %, étain 12 %, antimoine 15 %.

Composition moyenne des seconds : étain 75 %, plomb 5 %, antimoine 15 %, cuivre 5 %.

Ces alliages doivent être à la fois durs et plastiques, car ils sont utilisés comme pièces de frottement.

La dureté est fournie par les grains d'antimoine ou par la combinaison étain-antimoine. Ce sont ces grains qui servent de support à la pièce en mouvement. Comme ils sont enrobés dans la matière plastique que constitue l'étain ou le plomb, l'arbre supporté prend de lui-même sa place sur le coussinet, après quelques rotations.

Les régules sont blancs et inoxydables. Ils fondent à basse température, variable suivant la composition (environ 400°).

b) *Applications générales des antifrictions.*

Garniture intérieure de coussinets, de têtes de bielles, de glissières, etc.

Les régules au plomb, plus plastiques, servent à confectionner des bagues d'étanchéité, dans les presse-garnitures.

c) *Travail de l'antifriction.*

L'antifriction se coule très facilement, mais il faut éviter de le chauffer à trop haute température, car le métal serait détérioré.

Il s'usine très bien à l'outil avec la plus grande vitesse de coupe possible.

Il se travaille au grattoir et on peut le limer à condition d'utiliser des limes écouennes à taille spéciale, car le métal colle à la lime ordinaire.

◇

Les traitements thermiques

LES ALLIAGES FER-CARBONE

A. — Étude expérimentale élémentaire

L'étude expérimentale met en évidence l'influence du mode d'élaboration, des conditions de chauffage et de refroidissement de la composition chimique sur les caractéristiques des alliages fer-carbone.

Première série d'expériences.

Demandons à un fondeur de nous fournir quelques éprouvettes d'acier au carbone coulé C 35.

1. Après avoir amorcé la cassure, d'un trait de meule, brisons une éprouvette et examinons la section à la loupe : le grain de l'acier est beaucoup plus gros au centre que sur la périphérie qui s'est refroidie plus rapidement.

2. Chauffons une éprouvette à 1 000° (rouge cerise clair) et étirons-la au marteau-pilon ou sur l'enclume au marteau, sans jamais marteler au-dessous de 800° (rouge cerise naissant) ; laissons-la refroidir lentement. Si nous cassons cette nouvelle éprouvette, nous constatons que la section présente sur toute sa surface un grain régulièrement plus petit que sur celle de l'éprouvette simplement coulée.

3. Usinons des éprouvettes de traction et de résilience dans deux morceaux du même acier, dont l'un est simplement coulé et l'autre coulé puis forgé. Effectuons les essais et comparons les résultats.

   Nous trouvons que l'acier forgé est plus résistant, plus résilient et plus malléable que l'acier coulé de même composition.

CONCLUSIONS.

Le mélange fer-carbone, porté à l'état liquide puis refroidi, se solidifie sous forme de grains appelés *macrocristaux*, juxtaposés et liés entre eux par des actions de contact conférant sa résistance au métal obtenu.

Un traitement mécanique modifie la grosseur et la disposition des macrocristaux et, par suite, améliore les caractéristiques mécaniques.

Deuxième série d'expériences.

Préparons quatre éprouvettes prismatiques d'acier C 35, taillées dans la même barre.

1. La première est chauffée à 850°, puis refroidie lentement à l'air et cassée : on dit qu'elle est *recuite.*

2. La seconde est chauffée à 850°, puis trempée dans l'eau et cassée: on dit qu'elle est *trempée.* Le grain de la seconde éprouvette qui a été trempée est plus petit que le grain de la première éprouvette recuite.
   On constate que la grosseur finale des grains ne change pas, dans l'un ou l'autre cas, quelle que soit la durée de maintien des éprouvettes à la température de 850°.

3. La troisième éprouvette est chauffée à plus haute température (1 200° pendant 5 minutes), trempée dans l'eau et cassée. On constate que les grains sont plus gros que ceux des deux premières éprouvettes : le métal est dit *surchauffé.*

4. La quatrième éprouvette est chauffée également à 1 200°, mais elle est maintenue pendant une demi-heure à cette température. Elle est ensuite trempée et cassée. Les grains de cette quatrième éprouvette sont plus gros que ceux des autres.

Conclusions.

Pour un même acier, la grosseur des macrocristaux varie avec la température de chauffage, la vitesse de refroidissement et la durée du chauffage à température excessive :

— plus la température de chauffage est élevée, plus les grains sont gros, pour une même durée de refroidissement ;
— plus la vitesse de refroidissement est grande, plus les grains sont petits, pour une même température de chauffage.

La température de surchauffe et la vitesse de refroidissement étant les mêmes, plus la durée du maintien en température est grande, plus les grains sont gros.

Troisième série d'expériences.

1. Soit un acier laminé dur : C ou X C 75, dans l'état où il a été vendu, c'est-à-dire brut de laminage. Il peut se limer ; confectionnons deux éprouvettes.

   Chauffons la première à 750°, puis plongeons-la dans l'eau. Nous constatons que le métal ne peut plus se limer et qu'il est devenu fragile : on dit qu'il est *trempé.* Chauffons la seconde à 650°, puis plongeons-la dans l'eau : la dureté et la résilience du métal ne semblent pas avoir changé.

   Il existe donc, entre 650° et 750°, une température à partir de laquelle les effets de la trempe se font sentir : cette température correspond à une transformation interne du métal.

2. Reprenons l'une des éprouvettes, chauffons-la à 750° et laissons-la refroidir lentement : le métal peut se limer et semble avoir conservé la même dureté et la même résilience qu'initialement : on dit qu'il est *recuit.*

3. Mettons une pièce en acier (C 50 par exemple) sur une enclume et chauffons une extrémité avec un chalumeau.

Présentons un aimant en fer à cheval assez grand. Lorsque la température d'une extrémité passe par la couleur rouge clair (770°), le morceau d'acier n'est plus attiré que par une branche.

Lorsque toute la pièce aura dépassé la couleur du rouge clair, elle ne sera plus attirée par l'aimant.

Si on la laisse refroidir, on constate que l'acier redevient magnétique pour une température légèrement inférieure (750°).

La température pour laquelle l'acier cesse d'être magnétique est appelée *point de Curie.* C'est un point de transformation. Les transformations internes qui se produisent à certaines températures sont accompagnées de dégagement ou d'absorption de chaleur. Si l'on observe le métal posé sur l'enclume au moment du refroidissement, on constate que les extrémités en contact direct avec l'air ambiant se refroidissent les premières. Au fur et à mesure que le refroidissement gagne le milieu de la pièce, on voit apparaître, entre deux zones rouge sombre, un anneau plus brillant qui se déplace lentement vers le centre. L'augmentation de température résulte précisément de la chaleur dégagée par les modifications internes qui se produisent lorsque le métal traverse la zone de transformation. Ce phénomène est appelé *recalescence.* A l'échauffement, dans des circonstances semblables, il se produit au contraire, une absorption de chaleur.

Ces phénomènes peuvent être mis également en évidence à l'aide d'un fil d'acier tendu entre deux supports distants d'environ 1 mètre. Ce fil sert de conducteur électrique et est chauffé par le passage du courant.

En s'échauffant, il s'allonge et s'infléchit. La flèche croît régulièrement avec le temps de chauffage, sauf au passage des points de transformation : il y a absorption de chaleur ; la dilatation cesse un moment pour croître ensuite. Au refroidissement, quand le courant ne passe plus, la flèche diminue régulièrement, puis cesse de diminuer pendant le passage aux points de transformation, puisqu'il y a dégagement de chaleur.

CONCLUSIONS.

Pour chaque acier il existe des températures bien définies, auxquelles correspondent, à l'échauffement comme au refroidissement, des transformations internes conférant au métal des propriétés particulières : possibilité de trempe, modification des propriétés magnétiques. Ces températures portent le nom de *points de transformation.*

Les transformations internes étant accompagnées de modifications du système énergétique par absorption ou dégagement de chaleur, on est en droit de supposer que le système de cristallisation a changé, que la composition même des différents cristaux n'est plus la même.

B. — Étude métallurgique de l'alliage fer-carbone

L'étude métallurgique de l'alliage fer-carbone suppose des moyens expérimentaux complexes :

La **radiométallographie** renseigne sur la disposition atomique et a permis d'élaborer la théorie de la cristallisation.

La **micrographie**, faisant intervenir l'attaque aux différents réactifs et l'examen au microscope, permet l'étude de l'architecture des grains en mettant en évidence les constituants des aciers.

La **macrographie** montre la disposition des grains suivant les fibres.

Les analyses thermique, dilatométrique, électrique déterminent les points de transformation pour les différents aciers et rendent possible l'établissement des diagrammes d'équilibre.

Nous nous proposons de résumer aussi simplement que possible cette partie importante de la métallurgie. Nous avons volontairement limité cette étude à l'alliage binaire *fer-carbone* sans chercher à considérer la métallurgie des alliages ferreux comme un cas particulier de l'étude générale des alliages.

1° Cristallographie.

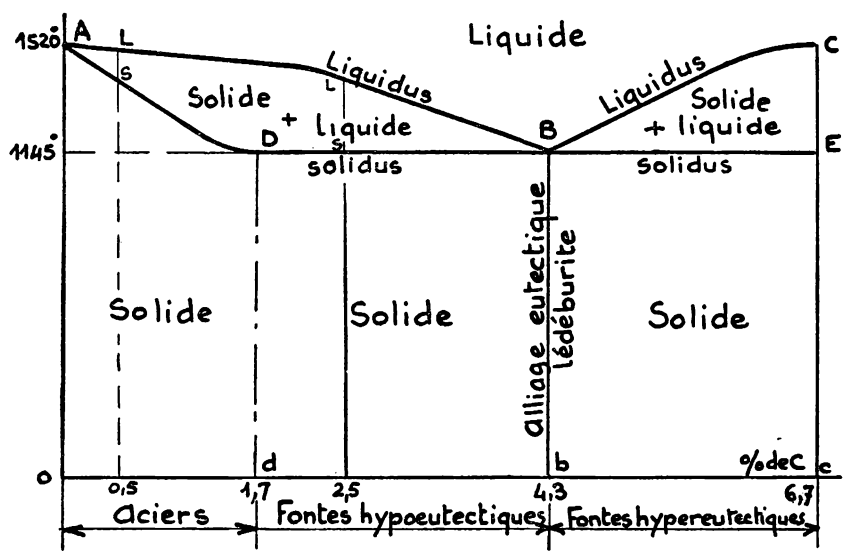


Fig. 1. — Diagramme de la solidification des alliages fer-carbone.

a) *Étude de la solidification.*

Considérons de l'acier C 50 à l'état liquide à 1 550° : le liquide comporte du fer et 0,5 % de carbone.

Laissons-le refroidir : nous constatons que la solidification n'est pas immédiate et ne se fait pas à température constante.

A partir de 1 500° (point L du diagramme, *fig.* 1), la solidification commence en de nombreux endroits et se développe suivant les axes d'un octaèdre, avec formation d'arborescences (*dendrites*) selon trois directions rectangulaires (*fig.* 2).

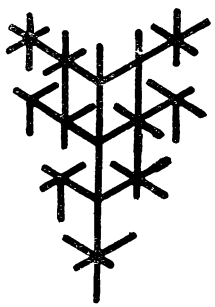


Fig. 2. — Dendrites.

Les dendrites s'enchevêtrent et engendrent finalement un *grain.*

La solidification est terminée quand la température est égale à 1 390° (point S du diagramme, *fig.* 1).

Pour une composition différente de l'alliage, par exemple Fe : 97,5 %, C : 2,5 %, les températures de début et fin de solidification ont pour valeur L = 1 400° et S = 1 145°.

La courbe représentant les différentes températures L, en fonction du pourcentage de carbone (*fig.* 1) porte le nom de *liquidus* : ABC; la courbe représentant les températures S porte le nom de *solidus* : ADBE.

Le plan se trouve divisé en plusieurs zones correspondant aux différents états :

— une zone liquide, au-dessus du *liquidus* ABC ;

— une zone solide, au-dessous du *solidus* ADBE ;

— deux zones de transformation de liquide en solide ou de solide en liquide, selon le sens de variation de la température : zones ADB et BCE.

Ce diagramme montre qu'un alliage comprenant 4,3 % de carbone se solidifie à température constante. Cet alliage est appelé *alliage eutectique.*

b) *Différents systèmes de cristallisation.*

Pénétrons, à l'aide des rayons X, dans le domaine du cristal.

Choisissons du fer aussi pur que possible, à l'état solide. La cassure d'un barreau de fer présente des grains, serrés les uns contre les autres, dont les dimensions sont de l'ordre du dixième de mm.

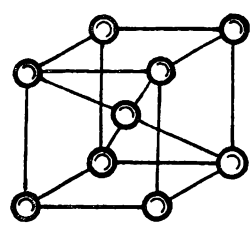


Fig. 3. — **Cristallisation dans le système cubique centré : la maille.**

Les rayons X nous révèlent que chaque grain comprend un nombre considérable d'atomes qui peuvent être disposés selon les deux systèmes suivants :

1° **Système cubique centré** (*fig.* 3) : les centres des noyaux des atomes sont disposés aux sommets et au centre de cubes dont l'arête a environ 0,3 mμ

(millième de micron). Les électrons des couches extérieures des atomes se meuvent librement dans les intervalles qui existent entre les atomes (il faudrait dire « entre les ions » puisqu'un atome qui a perdu un électron est chargé positivement et est appelé *ion*).

C'est ce mouvement d'électrons qui explique que le fer, comme les autres métaux, est conducteur de l'électricité et de la chaleur.

L'assemblage cubique des électrons porte le nom de *maille*. Les mailles formées s'assemblent entre elles (*fig.* 4) et constituent ainsi un *réseau* : c'est le *cristal*. Le cristal a des dimensions mille fois supérieures à celles de la maille, soit environ 0,3 μ. La juxtaposition enchevêtrée des cristaux constitue les dendrites au moment de la solidification et l'assemblage de dendrites donne les grains, encore appelés *macrocristaux*.

Une variété de fer désignée sous le nom de *fer* α cristallise dans le système cubique centré, ainsi d'ailleurs que les métaux *résistants* : chrome, nickel, tungstène, molybdène, vanadium.

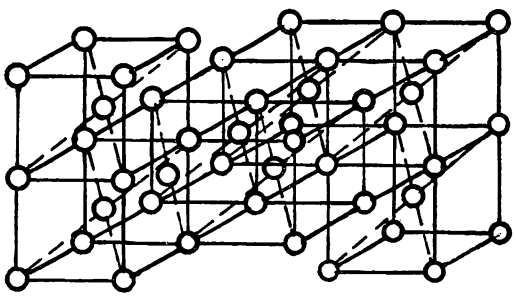


Fig. 4. — Cristallisation dans le système cubique centré : le **cristal.**

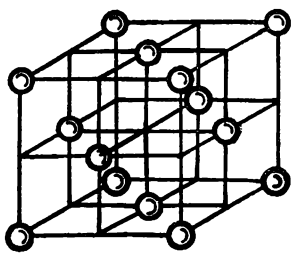


Fig. 5. — Cristallisation dans le système cubique à face centrée : la **maille.**

2° **Système cubique à face centrée** : les centres des ions occupent les sommets et les centres des faces des cubes (*fig.* 5). La longueur d'arête d'un cube est de 0,37 mμ.

Une autre variété de fer cristallise dans ce système : c'est le *fer* γ. D'autres métaux : l'aluminium, le nickel, le plomb, le cuivre, cristallisent dans ce système. Ils sont généralement *malléables*.

Le fer α et le fer γ constituent deux formes *allotropiques* du métal fer : elles ont les mêmes propriétés chimiques, mais diffèrent par certaines propriétés physiques.

3° **Autres modes de cristallisation.**

Il existe d'autres modes de cristallisation des métaux : les centres des ions occupant les sommets et points caractéristiques des surfaces de solides géométriques tels que le prisme hexagonal ou le prisme à base carrée.

2° Étude de l'architecture de l'alliage fer-carbone.

Il est utile de rappeler que les éléments de l'architecture métallique sont :

— la *maille*, représentant l'assemblage élémentaire des ions : cube centré, cube à face centrée, prisme hexagonal ou prisme à base carrée ;

— le *cristal*, constitué par un ensemble de mailles ;

— le *grain* ou *macrocristal*, constitué par l'agglomération de cristaux.

Les éléments de l'alliage, le fer et le carbone, peuvent se trouver sous les formes suivantes :

— fer pur cristallisé selon la variété α ou la variété γ. Le fer cristallisé sous la forme α porte le nom de *ferrite* ;

— carbone cristallisé : le *graphite* ;

— carbure de fer, combinaison de fer et de carbone, Fe_3C : la *cémentite*.

a) *La combinaison fer-carbone : la cémentite.*

La cémentite étant une combinaison de fer et de carbone, les atomes de fer et de carbone se groupent pour donner des molécules. Chaque molécule comprend trois atomes de fer intimement liés à un atome de carbone.

A la cristallisation, il y a toujours, dans chaque maille, le même nombre d'atomes de fer et de carbone qui sont dans le rapport de 3 à 1.

La cémentite ou carbure de fer est *homogène non seulement à l'échelle du cristal, mais aussi à l'échelle de la maille.*

b) *Le mélange fer-carbone.*

1° La solution solide.

Quand le carbone est intimement mélangé au fer, à l'intérieur même du cristal, on dit que le carbone est dissous dans le fer : on a une solution solide.

Les atomes de carbone se placent entre les vides interatomiques de certaines mailles de fer. Les propriétés du fer se trouvent ainsi modifiées.

La solution solide de carbone dans le fer γ porte le nom d'*austénite.*

La solution solide dans le fer α porte le nom de *martensite.*

Une solution solide est *homogène à l'échelle du cristal et hétérogène à l'échelle de la maille* puisque, à l'intérieur du cristal, les atomes de carbone ne sont pas également répartis dans les mailles.

2° L'agrégat.

Le mélange de fer et de carbure de fer peut se faire à l'intérieur du grain, par juxtaposition de réseaux de cristaux de fer et de réseaux de cristaux de carbure de fer. On obtient ainsi un *agrégat.*

L'agrégat est *homogène à l'échelle du grain.*

L'agrégat de fer et de carbure de fer (cémentite) est constitué par des lamelles

de fer α et des lamelles de cémentite disposées les unes sur les autres à l'intérieur même d'un grain. La proportion de carbone par rapport au fer est de 0,85 %. Cet agrégat porte le nom de *perlite lamellaire.* Le mélange est dit *eutectoïde.*

La perlite peut aussi être constituée par de la cémentite répartie sous la forme de petites sphères appelées *nodules* entre les grains de fer α : c'est la *perlite nodulaire.*

La perlite résulte d'un refroidissement très lent de l'acier chauffé au-dessus du point de transformation.

Si le refroidissement est moins lent, on voit apparaître un agrégat constitué par des lamelles alternées de fer α et de cémentite, beaucoup plus fines. De même composition que la perlite, mais de structure différente, cet agrégat a été appelé *troostite.*

3° L'architecture des pièces en alliage fer-carbone.

Les pièces en alliage fer-carbone sont composées de grains de constitution différente, disposés côte à côte sans arrangement particulier.

On peut rencontrer :

— *des grains homogènes* : ferrite, cémentite, graphite ;
— *des grains de solution solide* : austénite, martensite ;
— *des grains d'agrégats* : perlite, troostite.

La composition des volumes élémentaires de métal qui constituent la pièce (par exemple : la composition de chaque cm^3) étant la même, on dit que la pièce est faite d'un alliage homogène. Plus le volume élémentaire pris comme base de référence est petit, plus l'homogénéité est grande.

Ainsi dans la fonte, où le graphite est disposé en plages, le volume de référence est le cube de 1 ou 2 mm d'arête.

Pour l'acier, le volume de référence est le cube de 1/10 ou 2/10 de mm d'arête.

4° Points de transformation des aciers.

a) *Généralités.*

L'étude expérimentale nous a révélé, pour les aciers, l'existence de températures auxquelles correspondent des transformations internes, soit à l'échauffement, soit au refroidissement.

L'étude métallographique a montré que ces transformations intéressaient le mode de cristallisation, la nature des constituants et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques.

Ces transformations sont accompagnées, à l'échauffement, d'absorption de chaleur (*transformations endothermiques*) et, au refroidissement, de dégagement de chaleur (*transformations exothermiques*). On a donc pu déterminer les températures de transformation :

— soit par analyse thermique, c'est-à-dire en traçant la courbe des températures en fonction du temps ;

— soit par analyse dilatométrique, en comparant la variation de dilatation de l'échantillon à étudier à celle d'une éprouvette dont la courbe de dilatation ne présente aucune anomalie dans l'intervalle de température choisi.

Les transformations ne sont évidemment pas instantanées et ne se produisent pas à température constante. Il existe donc une température de début de transformation et une température de fin de transformation.

A l'échauffement. Pour les aciers ayant moins de 0,85 % de carbone, on désigne par A_{c1} la température de début de transformation des constituants et par A_{c3} la température de fin de transformation. La température de perte de magnétisme de la ferrite (fer α) est désignée par A_{c2}.

Pour les aciers ayant plus de 0,85 % de C, la température de début de transformation est désignée par A_{c1} et celle de fin de transformation par A_{cm}.

La température de perte de magnétisme de la cémentite est A_{c0}.

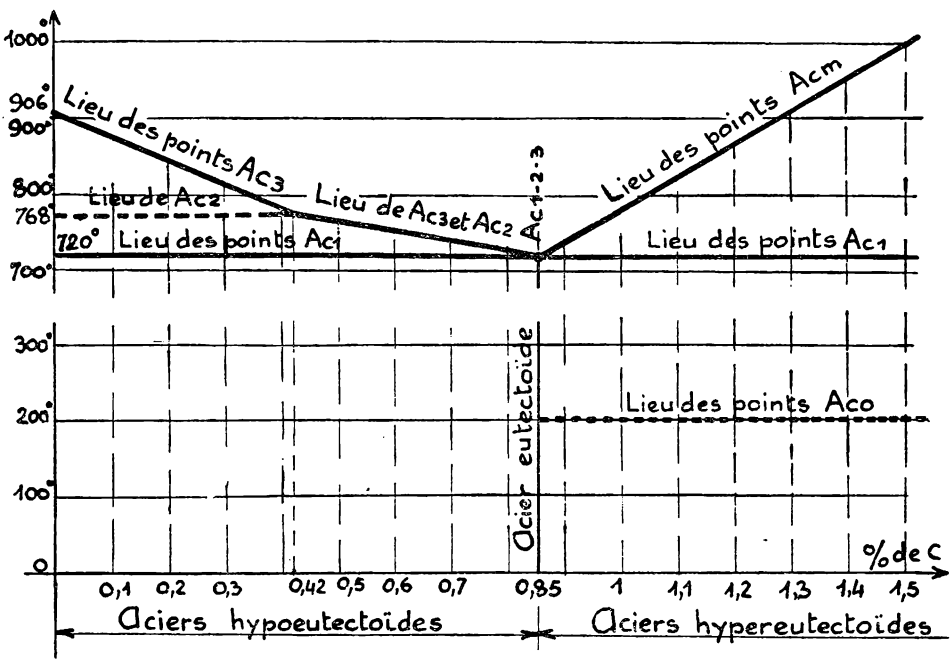


Fig. 6. — Diagramme des points de transformation à l'échauffement.

Les points de transformation A_{c1}, A_{c2}, A_{c3}, A_{cm}, A_{c0} s'écrivent souvent A_1, A_2, A_3, A_m, A_0. Le lieu des points de transformation a été établi en fonction des pourcentages de carbone des aciers. On obtient le diagramme des points de transformation (*fig.* 6), encore appelé *diagramme de Roozeboom.*

Au refroidissement. Les transformations se produisent en sens inverse. Les températures caractéristiques sont désignées comme suit :

Aciers à moins de 0,85 % *de carbone* :
- début de transformation : A_{r3} ou encore A'_r ;
- fin de transformation : A_{r1} ou encore A'''_r ;
- gain de magnétisme de la ferrite : A_{r2} ou encore A''_r.

Aciers à plus de 0,85 % *de carbone* :
- début de transformation : A_{rm} ou encore A'_r ;
- fin de transformation : A_{r1} ou encore A'''_r ;
- gain de magnétisme de la cémentite : A_{r0}.

L'expérience a montré que :

$$A_{c3} > A_{r3},\ A_{c1} > A_{r1},\ A_{c2} > A_{r2}$$
$$A_{cm} > A_{rm},\ A_{c0} > A_{r0}.$$

Plus la vitesse de refroidissement est grande, plus les températures A_{r1}, A_{r2}, A_{r3} sont basses.

b) *Analyse thermique.*

Dans un four à *moufle* (*fig.* 7), on dispose une pièce d'acier percée d'un trou borgne dans lequel on place un *couple pyrométrique* en liaison avec un dispositif permettant d'enregistrer la température de la pièce en fonction du temps.

La courbe de variation de la température présente des anomalies qui correspondent précisément aux températures de transformation.

Les courbes relevées pour des aciers à 0,2 %, 0,55 %, 0,85 % et 1,2 % de carbone (aciers C 20, C 55, C 85, C 120) sont représentées sur la *figure* 8.

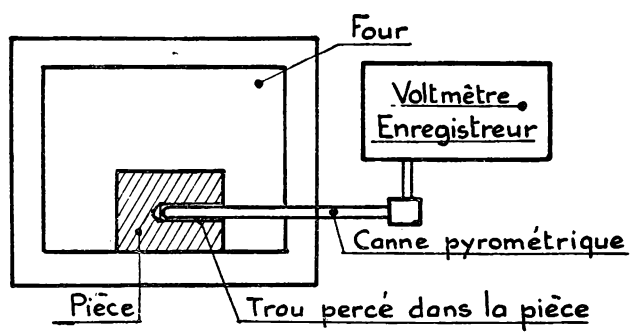


Fig. 7. — Dispositif expérimental pour l'analyse thermique.

On remarquera que, pour l'acier C 20, les six points A_{c1}, A_{c2}, A_{c3}, A_{r1}, A_{r2} et A_{r3} sont distincts.

Pour l'acier C 55, les points A_{c2} et A_{c3} sont confondus, ainsi que les points A_{r2} et A_{r3}.

Pour l'acier C 85, les points A_{c1}, A_{c2}, A_{c3} sont confondus, ainsi que les points A_{r1}, A_{r2} et A_{r3}.

Pour l'acier C 120, les points A_{c1} et A_{c2} sont confondus, ainsi que les points A_{r1} et A_{r3}. Les notations A_{cm} et A_{rm} se sont substituées aux notations A_3 et A_{r1}.

Sur les diagrammes correspondant aux aciers C 55 et C 85, on peut constater que lorsque la vitesse de refroidissement augmente (droite plus inclinée sur la verticale), les écarts entre les points de transformation correspondant à des modifications internes de sens contraire vont en augmentant.

Puisque l'on a : $V_2 > V_1$, il en résulte que :

$$a_2 > a_1 \qquad \text{et} \qquad b_2 > b_1.$$

L'analyse thermique est pratiquement difficile à réaliser. Ses résultats ne sont pas aussi nets qu'on serait tenté de le croire après examen des diagrammes de la *figure* 8 qui, pour des raisons pédagogiques, ont été volontairement simplifiés. Les points de transformation qui sont le mieux mis en évidence sont A_{c1} et A_{r1}.

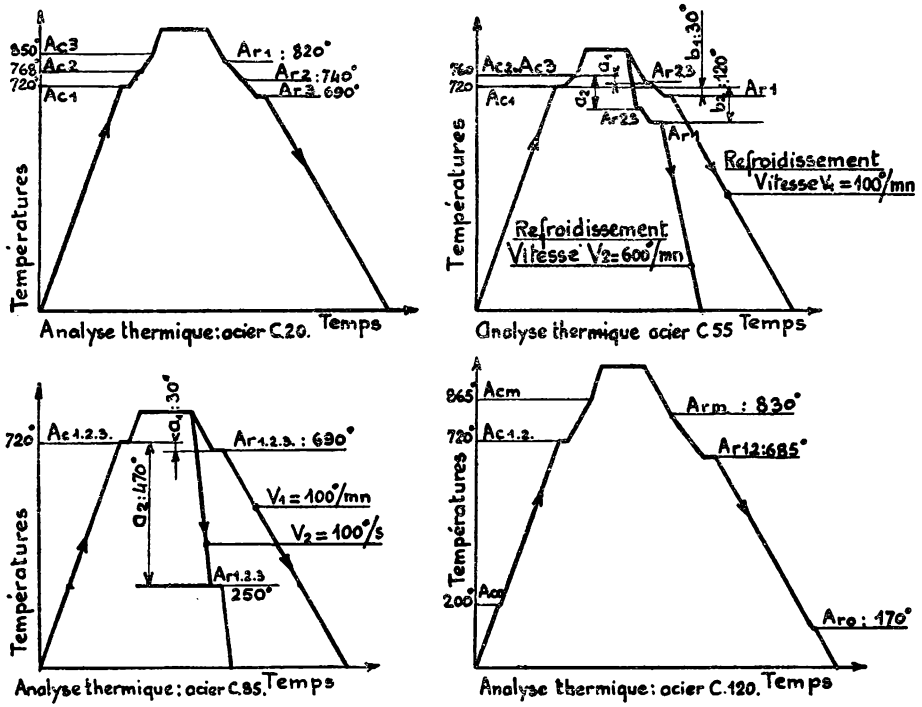


Fig. 8. — Résultats graphiques de l'analyse thermique pour des aciers à 0,2 ; 0,55 ; 0,85 ; 1,2 % de carbone.

c) *Analyse dilatométrique.*

L'analyse thermique est complétée par l'analyse dilatométrique, la micrographie et la radiocristallographie.

Pour réaliser l'analyse dilatométrique, on utilise industriellement le *dilatomètre différentiel Chevenard* à enregistrement photographique ou mécanique.

On compare la dilatation d'une éprouvette de l'alliage considéré à celle d'un corps qui ne présente aucune anomalie de dilatation : le corps choisi est le *pyros*, alliage de nickel contenant 3 % de fer, 3 % de manganèse, 4 % de tungstène et 8 % de chrome.

L'éprouvette du métal à étudier et celle de pyros, qui ont les mêmes dimensions, sont placées dans deux tubes identiques en silice, et chauffées dans un four (*voir fig.* 9). Un système mécanique, simplifié à l'extrême sur la figure, permet l'enregistrement de la différence de dilatation des deux éprouvettes, en fonction de la température. Cet enregistrement est obtenu par un stylet en contact avec une feuille de papier animée d'une translation proportionnelle à la température.

On obtient une courbe semblable à celle qui est représentée sur la *figure* 10.

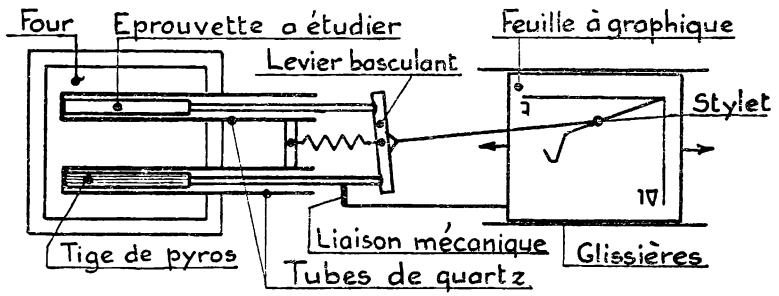


Fig. 9. — Schéma du dilatomètre différentiel Chevenard.

Le coefficient de dilatation du pyros étant supérieur à celui de l'acier, la courbe s'écarte régulièrement de l'axe des températures. Lorsque la température atteint A_{c1} (vers 720°), la transformation interne se produit en absorbant de la chaleur : l'éprouvette à étudier cesse de se dilater. Le pyros augmente seul de longueur : le stylet trace sur la feuille à graphique une ligne très oblique par rapport à l'axe des températures. L'abscisse du point M (changement de direction de la courbe de différence de dilatation) est égale à la température A_{c1}. La courbe correspondant au refroidissement, tracée en pointillé, permet de déterminer, en M', la température A_{r3}.

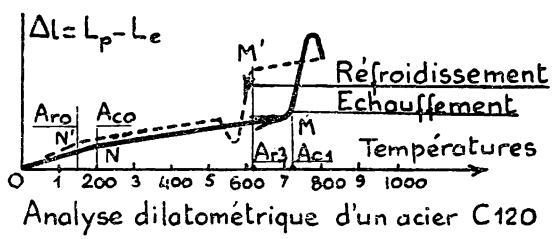


Fig. 10. — Courbe de dilatation enregistrée au dilatomètre Chevenard.

d) *Micrographie.*

La *micrographie* ou *métallographie microscopique* a pour objet de mettre en évidence les constituants des aciers : métaux purs, combinaisons, solutions solides, agrégats.

Principe de la micrographie.

On examine au microscope une section de l'éprouvette, polie puis attaquée à l'aide de réactifs appropriés aux différents constituants, lavée abondamment et séchée soigneusement. Il est également possible de substituer à l'examen visuel la photographie de l'image microscopique (*voir fig.* 11).

— Le polissage doit être parfaitement soigné : il s'effectue à la *meule lapidaire* et se termine au *feutre armé de potée d'émeri* de plus en plus fine, constituée par des grains d'abrasif (nos 400 à 600), puis de suspension d'alumine, de plus en plus fins (désignés habituellement par *alumine 6 heures*, ou *alumine 12* ou *24 heures*, selon le temps exigé pour le dépôt de l'alumine en suspension). On peut aussi utiliser le *polissage électrolytique.*

— L'attaque est obtenue par immersion de la face à examiner dans le réactif en solution aqueuse ou « alcoolique » d'acide nitrique, picrique...

Les principales solutions sont les suivantes :

a) *Pour aciers et fontes.*

— Pour déceler les cristaux de ferrite et de perlite :
Solution aqueuse d'acide nitrique (50 cm³ par litre),
Solution alcoolique d'acide picrique (40 g par litre).

— Pour déceler la cémentite :
Solution aqueuse de picrate de sodium (20 g d'acide picrique et 250 g de soude par litre).

b) *Pour alliages cuivreux.*
Solution alcoolique de chlorure ferrique.

c) *Pour alliages d'aluminium.*
Solution alcoolique d'acide fluorhydrique.

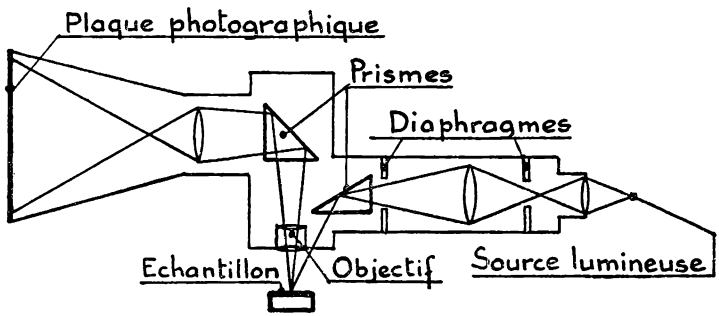


Fig. 11. — Microscope avec dispositif de projection ou de photographie.

5° Les constituants des aciers.

a) *Variétés allotropiques du fer.*

— Le fer α : il existe au-dessous de 906°, cristallise dans le système cubique

centré, ne dissout pas le carbone jusqu'à 720°. Il est magnétique jusqu'à 768° (point de Curie) et n'est plus ferromagnétique au-delà de 768°.

— Le fer γ : il existe entre 906° et 1 400°, cristallise dans le système cubique à face centrée, dissout le carbone et est *amagnétique.*

— Le fer δ, cité pour mémoire dans cette étude élémentaire. Il existe de 1 400° à 1 528° (point de fusion). Identique au fer α, il dissout un peu le carbone.

Le graphique (*fig.* 12) résume les propriétés des différentes variétés allotropiques du fer.

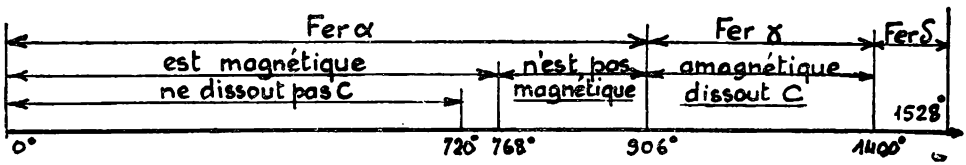


Fig. 12. — Graphique des variétés allotropiques du fer.

b) *Constituants des aciers recuits à des températures inférieures au point de transformation A_{c_1} = 720°.*

1° Aciers ayant moins de 0,85 % de carbone.

Ils sont constitués de ferrite et perlite. Au fur et à mesure que le pourcentage de carbone augmente pour s'approcher de 0,85, le nombre des grains de ferrite diminue.

a) *Ferrite.*

La ferrite est du fer α. Elle constitue l'élément résistant et résilient des aciers. La dureté Rockwell (pénétrateur : bille de 3 mm ; charge : 90 kgf ou 900 N) a pour valeur $HR_b = 16$. Les réactifs habituels ne la colorent pas, mais révèlent le contour des joints (*fig.* 13).

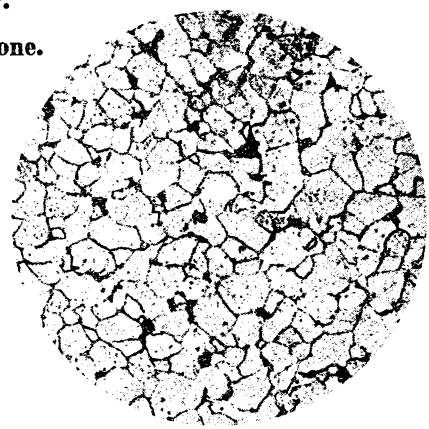


Fig. 13. — Microphotographie d'un acier à 0,10 % de carbone (grossissement G = 100). Taches claires : **ferrite** ; taches sombres : **perlite.**

b) *Perlite.*

La perlite, agrégat de fer et de carbure de fer, est l'eutectoïde fer-carbone. Chaque grain est constitué par des lamelles de ferrite alternées avec des lamelles de cémentite. La perlite doit sa dureté à la cémentite, sa résilience et sa malléabilité moyennes à la ferrite. La dureté Rockwell (pénétrateur en diamant ; charge : 150 kgf ou 1 500 N) a pour valeur $HR_c = 18$ à 20.

La structure lamellaire apparaît, à la photographie, avec un fort grossissement, sous la forme d'empreintes digitales (*fig.* 14 et 14 *bis*).

2° Aciers ayant 0,85 % de carbone.

Ces aciers, dits eutectoïdes, sont constitués de perlite.

3° **Aciers ayant plus de 0,85 % de carbone.**

Ils sont composés de perlite et de cémentite. Au fur et à mesure que le pourcentage de carbone augmente, le nombre de grains de perlite diminue ; ils sont remplacés par de la cémentite.

Cémentite.

La cémentite est du carbure de fer Fe_3C. Elle est très dure ($HR_c = 40$) et très fragile. Elle n'est colorée que par la solution de picrate de sodium à l'ébullition (*fig.* 15 et 15 *bis*).

Fig. 14. — Microphotographie d'un acier à 1,2 % de carbone (G = 500). En noir : perlite ; en blanc : cémentite libre.

Fig. 14 *bis*. — Perlite lamellaire (G = 2 800). En noir apparaît la ferrite et en blanc la cémentite.

Fig. 15. — Microphotographie d'un acier à 1,4 % de carbone (G = 100). En noir : perlite ; en blanc : cémentite libre.

Fig. 15 *bis*. — Microphotographie d'un acier à 1,1 % de carbone (G = 1 000) ; refroidissement très lent. En noir : perlite ; en blanc : cémentite globulaire.

c) *Constituant des aciers recuits chauffés à une température supérieure aux points A_{c3} et A_{cm}.*

Le constituant est l'austénite.

L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer γ. Elle n'est pas magnétique. Sa teneur en carbone est variable. L'austénite est le constituant des aciers chauffés au-dessus de A_{c3}. La limite supérieure d'existence de l'austénite est évidemment le point de fusion. On peut obtenir l'austénite à froid par un refroidissement extra-rapide faisant suite à un chauffage au-dessus de A_{c3}.

Certains éléments d'addition, comme le nickel et le manganèse en teneur suffisante, donnent aux aciers à température ordinaire une structure austénitique stable. Ils sont insensibles aux traitements thermiques.

Fig. 16. — Microphotographie d'un acier au manganèse (G = 100). En blanc : austénite ; en noir : carbures de fer et de manganèse.

Les cristaux d'austénite, attaqués par solution à l'acide picrique, ne se colorent pas, mais leur contour apparaît en noir sur la photographie (*voir fig.* 16).

6° Les transformations au cours du chauffage.

a) *Principes.*

— Aucune modification ne se produit lorsqu'on chauffe les aciers recuits jusqu'à la température A_{c1}. On note cependant que la cémentite des aciers hypereutectoïdes (ayant plus de 0,85 % de carbone) cesse d'être magnétique vers 200° : c'est le point A_{c0} (*voir fig.* 17).

— Lorsqu'on atteint la température A_{c1}, il y a transformation rapide de la perlite en austénite (l'agrégat devient une solution solide). Cette transformation se fait avec une importante absorption de chaleur.

On notera que pour les aciers eutectoïdes à 0,85 % de carbone, il y a transformation totale de la masse métallique perlitique en austénite.

— Pendant l'intervalle de température compris entre les points de transformation extrêmes A_{c1} et A_{c3} ou A_{cm}, les transformations suivantes se produisent :

b) *Aciers hypoeutectoïdes (contenant moins de 0, 85 % de carbone).*

La ferrite se dissout progressivement dans l'austénite résultant de la transformation de la perlite. Cette dissolution suppose la transformation du fer α en fer γ,

accompagnée d'un changement de mode de cristallisation (du système cubique centré au système cubique à face centrée). Cette transformation nécessite un écart de température entre A_{c1} et A_{c3}, d'autant plus grand qu'il y a davantage de ferrite, donc moins de carbone.

Pendant cette modification de structure, il y a absorption de chaleur. Il en résulte, sur les graphiques d'analyse de température, une modification du rythme d'accroissement de la température ou, sur le graphique d'analyse dilatométrique, une diminution du coefficient de dilatation du métal. La température A_{c3} marque la fin de la transformation et le retour aux lois d'accroissement de température du métal, semblables à celles qui sont vérifiées avant la température A_{c1}.

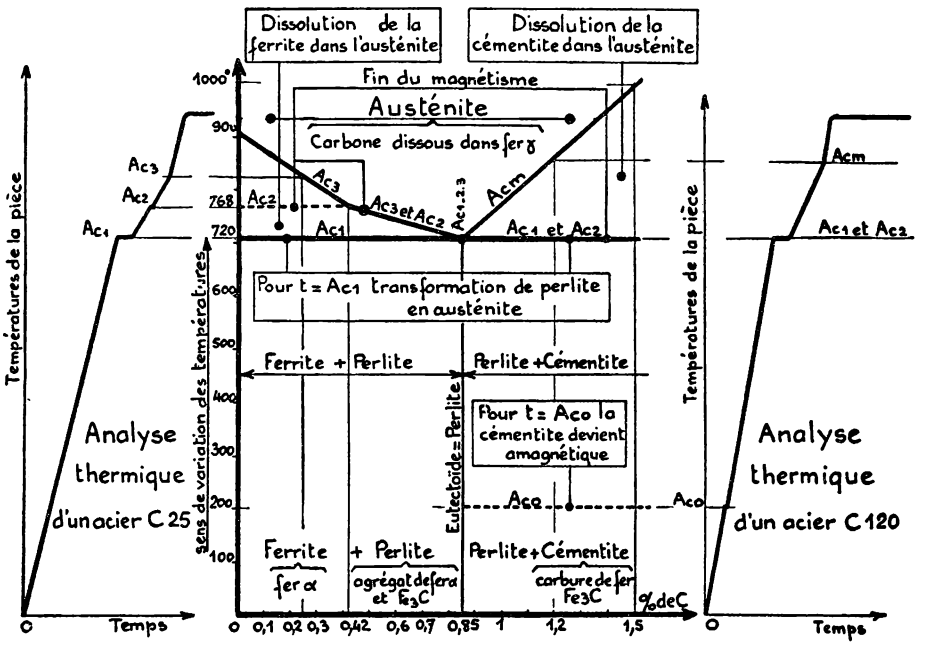


Fig. 17. — Diagramme de la structure des aciers au cours de l'échauffement.

La perte de magnétisme se produit au fur et à mesure que le fer α se transforme en fer γ. Mais il faut cependant noter que le fer α cesse d'être magnétique à 768° (point A_{c2}). Donc, pour les aciers ayant moins de 0,42 % de carbone, la perte totale du magnétisme se produit à 768° ; les aciers ayant 0,42 à 0,85 % de carbone cessent d'être magnétiques lorsque la température est égale à A_{c3} : les points de transformation A_{c3} et A_{c2} sont confondus.

c) ***Acier eutectoïde (contenant 0,85 % de carbone).***

La transformation de perlite en austénite intéresse la totalité du métal. Elle se fait à la température A_{c1}. La perte de magnétisme se produit en même temps. Donc, les trois points de transformation A_{c1}, A_{c2}, A_{c3} sont confondus.

d) ***Aciers hypereutectoïdes (contenant plus de 0,85 % de carbone).***

Entre A_{c1} et A_{cm}, la cémentite se met en solution dans l'austénite résultant de la transformation de la perlite en A_{c1}. Cette mise en solution s'effectue progressivement.

Au point A_{cm}, la transformation est terminée ; le métal ne comporte plus que de l'austénite.

La perte du magnétisme se produit au passage en A_{c1}, quand la perlite magnétique se transforme en austénite : la cémentite cesse d'être magnétique depuis A_{c0} (200° environ). Les points A_{c1} et A_{c2} sont ainsi confondus. Cette transformation, comme celle des aciers hypoeutectoïdes, se fait évidemment avec absorption de chaleur.

Sur le graphique (*fig.* 17), nous avons résumé l'étude élémentaire de l'échauffement des aciers.

7° Les transformations au cours du refroidissement.

La vitesse de refroidissement a une grande influence sur la constitution finale des aciers. Nous supposerons un acier préalablement porté à A_{c3} + 50° ou A_{cm} + 50° : il est constitué par de l'austénite. Les vitesses de refroidissement considérées seront définies par le temps nécessaire à un abaissement de température de 100°.

a) ***Refroidissement très lent. Vitesse : 100° par heure.***

Il peut être obtenu en laissant la pièce se refroidir dans le four.

Les points de transformation au refroidissement sont inférieurs de 20 ou 30° aux points correspondants, à l'échauffement.

1° Aciers contenant moins de 0,85 % de carbone.

Le point A_{r3} marque le début de la transformation de fer γ en fer α : les cristaux de ferrite apparaissent. Le changement de système de cristallisation se fait avec absorption de chaleur (transformation endothermique). En A_{r2}, le fer α redevient magnétique ; en A_{r1}, l'austénite se transforme en perlite. On obtient finalement, à basse température, un mélange de ferrite et de perlite.

2° Aciers contenant 0,85 % de carbone.

Vers 690 ou 700°, l'austénite se transforme en perlite

3° Aciers contenant plus de 0,85 % de carbone.

La cémentite se reforme entre A_{cm} et A_{r1}. En A_{r1-2}, l'austénite restante se transforme en perlite. Le fer α de la perlite redevient magnétique en A_{r1} et la cémentite en A_{r0}.

L'acier refroidi est constitué de cémentite et de perlite.

b) *Refroidissement lent. Vitesse : 100° par minute.*

Fig. 18. — Microphotographie d'un acier à 1,5 % de carbone (G = 150) ; refroidissement lent. En noir : troostite ; en blanc : cémentite.

Il peut être obtenu en laissant la pièce à l'air libre. Les transformations sont en tous points semblables aux précédentes. On constate cependant une diminution de la grosseur du grain. La perlite est remplacée par de la troostite.

Les aciers contenant moins de 0,85 % de carbone comprennent de la ferrite et de la troostite ; l'acier à 0,85 % : de la ferrite ; les aciers à plus de 0,85 % de carbone : de la troostite et de la cémentite.

La troostite est un constituant dont la composition physico-chimique est identique à celle de la perlite, mais qui a une structure et des propriétés différentes. Elle est constituée par des lamelles alternées de cémentite et ferrite plus minces, ce qui donne une dureté légèrement augmentée : $HR_c = 26$, au lieu de 20.

La *figure* 18 est une microphotographie sur laquelle on aperçoit la troostite mélangée à de la cémentite.

c) *Refroidissement rapide. Vitesse : de 50 à 200° par seconde.*

Il correspond à celui de pièces de petites dimensions, plongées dans l'eau.

Les températures de transformation se sont abaissées considérablement : $A_{r1} = 250°$ environ.

Un constituant nouveau apparaît à la place de la troostite : on l'appelle la martensite.

Les aciers hypoeutectoïdes comportent, en principe, de la ferrite et de la martensite ; l'eutectoïde : de la martensite ; les aciers hypereutectoïdes : de la cémentite et de la martensite.

La martensite se forme aux environs de A_{r1}, tandis que la transformation de l'austénite en ferrite (aciers hypoeutectoïdes) se produit entre A_{r3} et A_{r1} ; la reconstitution de cémentite libre (aciers hypereutectoïdes) dure pendant la période comprise entre A_{rm} et A_{r1-2}.

Cet intervalle de température dure peu de temps, puisque la vitesse de refroidissement est rapide. Aussi trouve-t-on à froid quelques cristaux d'austénite mélangés aux autres constituants.

La vitesse de refroidissement qui favorise la formation acceptable de martensite est appelée *vitesse critique de trempe.*

— *La martensite.*

La martensite, constituant des aciers trempés, résulte d'une transformation incomplète de l'austénite ; celle-ci n'a pas eu le temps de donner un agrégat (troostite ou perlite) au passage en A_{r1}.

La martensite est une solution solide de carbone dans le fer α.

Elle est très dure : $HR_c = 53$, mais aussi très fragile. Sa structure est en aiguille, comme le montre la microphotographie (*fig.* 18 *bis*).

Fig. 18 *bis.* — Microphotographie d'un acier à 1,5 % de carbone (G = 2 200) ; refroidissement. rapide. **Structure martensitique.** En clair : austénite ; en noir : aiguilles de martensite.

d) *Refroidissement très rapide. Vitesse : de 500 à 1 000° par seconde.*

Il correspond à de très petites pièces plongées dans de l'eau glacée ou dans un gaz liquéfié (air liquide par exemple).

Le point de transformation A_{r1} de l'acier se trouve considérablement abaissé. La transformation de l'austénite en martensite, qui se fait dans l'intervalle de température compris entre A_{r1} et la température du bain, est nécessairement très incomplète. Il subsiste une proportion importante d'austénite dans l'acier qui vient de subir la trempe. L'acier est dit *hypertrempé.*

La présence d'une forte proportion d'austénite à côté de la martensite rend la pièce moins dure. Certains métallurgistes pensent que la production d'austénite à froid dépend non seulement de la vitesse de refroidissement mais surtout de la température du bain de trempe.

e) *Diagrammes des refroidissements.*

Bien qu'à notre connaissance les différents diagrammes des points de transformation au refroidissement, en fonction de la teneur en carbone, n'aient pas été déterminés avec précision, nous donnons (*fig.* 19) un diagramme qui résume l'étude du refroidissement des aciers au carbone. Les tracés des lieux de A_{r1}, A_{r2}, A_{r3} pour les différentes vitesses ont été représentés très approximativement.

Sur ce graphique, nous avons mis en place les diagrammes des points A_{c1}, A_{c2}, A_{c3}, A_{cm} et tracé la courbe des températures de chauffage en vue de la trempe ou des recuits.

On remarquera que, pour les aciers hypereutectoïdes, les températures de trempe choisies sont $A_1 + 50°$ et non $A_{cm} + 50°$. Ceci résulte du fait que le constituant autre que la cémentite — c'est-à-dire la perlite, la troostite, la martensite, selon l'état initial de l'acier chauffé — se transforme en austénite à la température A_{c1}. Au refroidissement, cette austénite donnera la martensite.

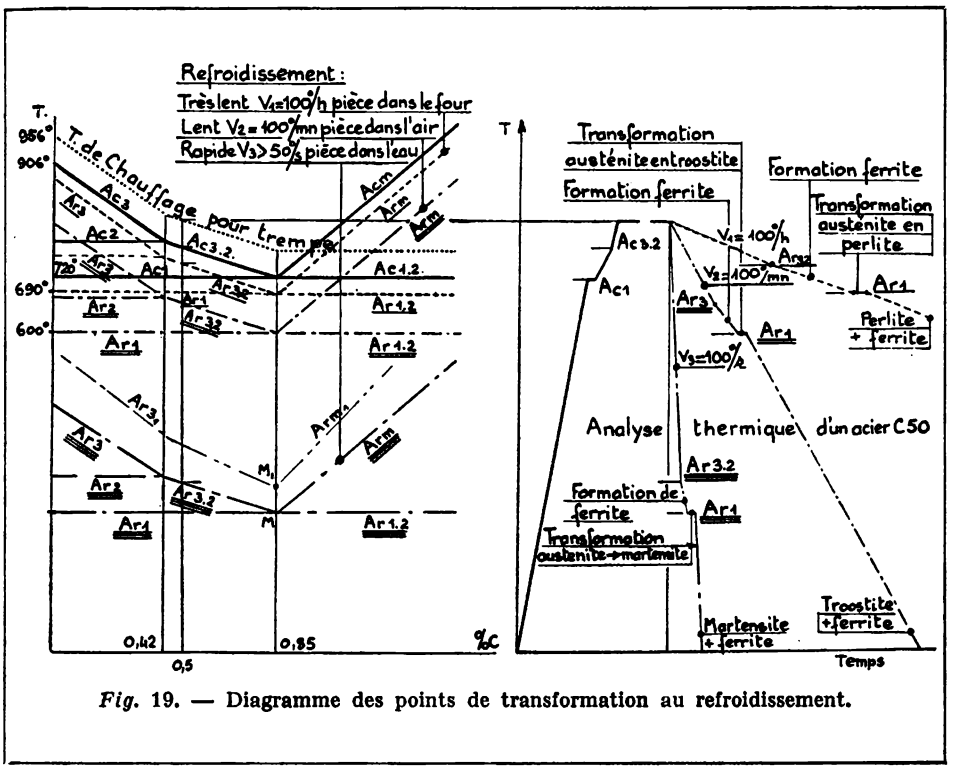


Fig. 19. — Diagramme des points de transformation au refroidissement.

Il est inutile de chauffer jusqu'en A_{cm} pour dissoudre la cémentite. On augmenterait les risques de tapure à la trempe, la cémentite (comme la martensite) n'étant pas malléable.

On remarquera également, pour certaines grandes vitesses de refroidissement, le dédoublement du point eutectoïde M. Il y a en M_1 le point A_{r3} et en M le point A_{r1}.

f) *Diagramme d'équilibre des alliages fer-carbone.*

Le diagramme (*fig.* 20) apporte des compléments intéressants à la *figure* 1 (page 116), représentant le *liquidus* et le *solidus* de l'alliage fer-carbone. La formation de fonte grise et de fonte blanche dépend non seulement de la vitesse de refroidissement, mais aussi de la présence de corps d'addition qui jouent le rôle de catalyseurs, en favorisant la précipitation du graphite : c'est le rôle joué par le silicium.

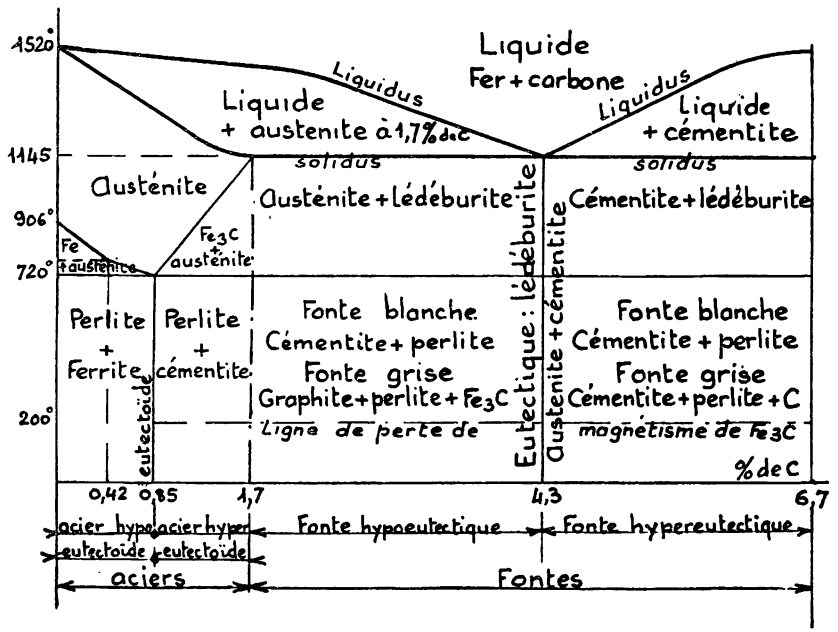


Fig. 20. — Diagramme d'équilibre des alliages fer-carbone.

g) *Le grossissement des grains.*

Nous avons vu, à l'occasion de l'étude expérimentale, que la grosseur des grains des aciers peut être modifiée par des traitements thermiques, et leur forme par des traitements mécaniques.

Un acier dont le grain est grossier peut être usiné facilement, parce que le copeau se brise aisément ; mais sa résilience est moins bonne que lorsque le grain est petit et serré, sans que la résistance se trouve améliorée. On a donc intérêt à obtenir des pièces à grain fin.

Le mécanisme du grossissement du grain est traduit sur la *figure* 21.

— La dimension du grain dépend de l'échauffement et de la durée de mise en température. Il ne dépend pratiquement pas du refroidissement.

— La grosseur du grain ne change pas pendant la période de chauffage correspondant au passage de la température ambiante à la température A_{c1}.
— Le grain, quelle que soit sa grosseur initiale, devient fin quand le métal passe de la température A_{c1} à A_{c3}.
— Le grain grossit rapidement quand la température passe de A_{c3} à A_{c3} + 250 à 400°. On dit que le métal est *surchauffé*.

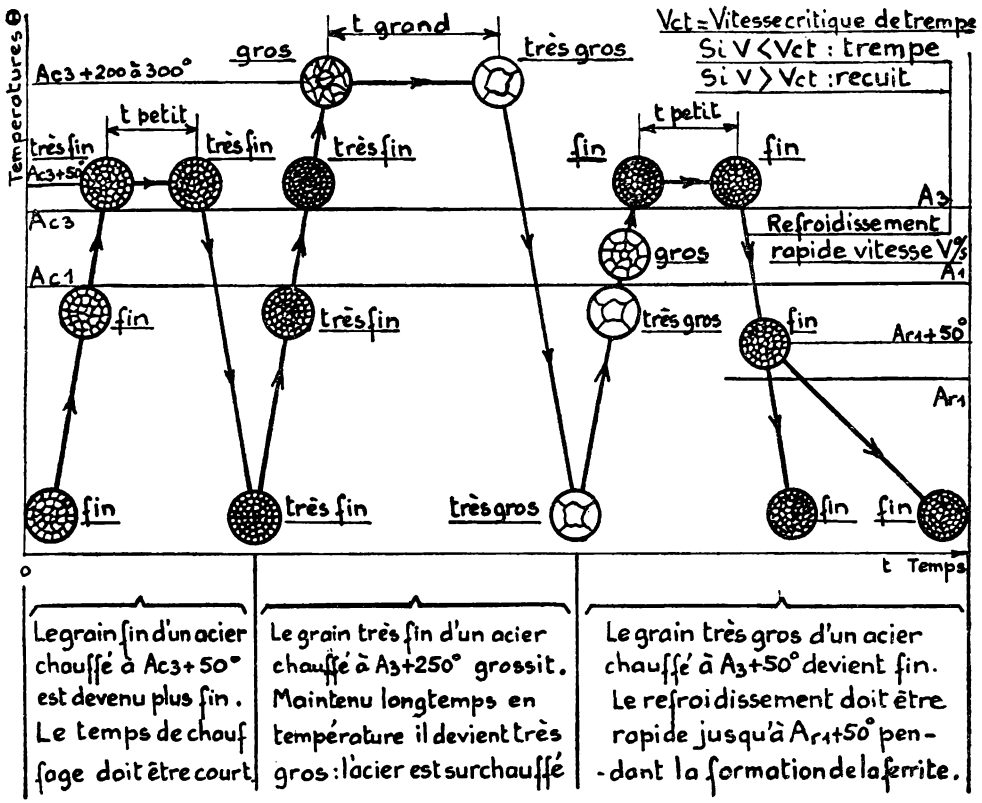

Températures
t grand
gros
très gros
Vct = Vitesse critique de trempe
Si V < Vct : trempe
Si V > Vct : recuit
Ac3 + 200 à 300°
t petit
très fin
Ac3 + 50°
Ac3
Ac1
fin
Refroidissement rapide vitesse V%
A3
Ar1+50°
Ar1
0
t Temps
Le grain fin d'un acier chauffé à Ac3+50° est devenu plus fin. Le temps de chauffage doit être court.
Le grain très fin d'un acier chauffé à A3+250° grossit. Maintenu longtemps en température il devient très gros : l'acier est surchauffé
Le grain très gros d'un acier chauffé à A3+50° devient fin. Le refroidissement doit être rapide jusqu'à Ar1+50° pendant la formation de la ferrite.

Fig. 21. — Mécanisme du grossissement des grains.

— Le grossissement du grain est important lorsque l'on soumet longtemps le métal à la température de surchauffe. On constate un léger grossissement lorsqu'on maintient longtemps le métal à une température légèrement supérieure à A_{c3} : A_{c3} + 50°, par exemple. C'est pourquoi il y a intérêt à chauffer les aciers très peu au-dessus de leur point de transformation et juste le temps nécessaire pour qu'ils atteignent à cœur la température de chauffe, avant d'effectuer la trempe.
— Entre A_{r3} et A_{r1}, pendant la formation de la ferrite, il y a tendance au grossissement si la durée du refroidissement est trop grande.

Le traitement de régénération d'un acier à gros grain comporte donc :

— un chauffage à A_{c3} + 50° ;

— un maintien en température assez court (10 mn environ) ;

— un refroidissement rapide de A_{c3} + 50° à A_{r1} + 50° (vitesse de 100° en 1 à 5 mn) ;

— un refroidissement lent ou rapide de A_{r1} + 50° à 20°.

8° Étude métallurgique des aciers alliés.

Les diagrammes d'équilibre des aciers alliés sont difficiles à tracer parce que le nombre de variables est supérieur à 2. On est donc conduit à supposer successivement constantes les variables en excès.

Si l'on considère un acier à 2 éléments alliés, Ni et Cr par exemple, les variables seront la température *t*, les pourcentages de C, de Ni, de Cr. On pourra donc tracer les diagrammes des points de transformation, en fonction de *t* et de la teneur en C, en supposant le pourcentage de Ni pour différentes valeurs de la teneur en Cr, et opérer d'une façon identique pour chaque valeur de la teneur en nickel.

Nous nous proposons de donner très simplement les résultats approximatifs des études faites jusqu'à ce jour, particulièrement sur les alliages comprenant un seul élément allié.

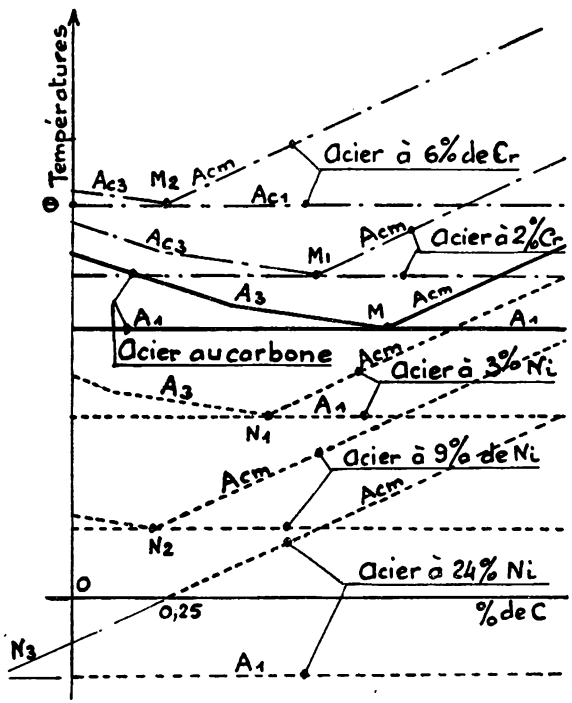


Fig. 22. — Diagrammes approximatifs des aciers alliés.

a) *Diagramme des points de transformation des aciers alliés.*

1° Quand la teneur d'élément allié reste constante, le diagramme d'équilibre est semblable à celui de l'alliage binaire fer-carbone.

2° La température A_{c1} est :

— **élevée**, quand l'élément d'addition est le *chrome*, le *silicium*, le *tungstène*, le *vanadium*, *l'aluminium* (Cr, Si, W, Va, Al) ;

— **abaissée**, quand l'élément d'addition est le *nickel*, le *manganèse*, le *cobalt*, le *cuivre* (Ni, Mn, Co, Cu).

3° Le point eutectoïde est déplacé dans le sens des moindres pourcentages de carbone (vers la gauche). La teneur en carbone de l'acier allié eutectoïde est d'autant plus faible que la teneur en élément allié est plus grande.

Le diagramme, très approximatif, tracé sans précision (*fig.* 22), a pour objet de mettre en évidence la position des points de transformation des aciers alliés.

On constate :

— l'élévation des points de transformation de l'acier au chrome ;

— la diminution de ces mêmes points pour les aciers au nickel, par rapport à ceux des aciers au carbone.

De même, on peut se rendre compte du déplacement vers la gauche des points eutectiques M_1, M_2, N_1, N_2 et N_3 (point théorique).

— Lorsque la teneur en chrome augmente, la température $A_{c1} = \theta$ augmente. Quand θ égale la température de fusion, l'acier n'a plus de points de transformation ; il reste à l'état ferritique et ne peut se tremper ni être régénéré.

— Lorsque la teneur en nickel augmente, les points de transformation baissent de telle façon que l'acier est toujours austénitique : il est très malléable, résilient et peu dur. Ainsi, l'acier à 24 % de Ni est austénitique si la teneur en carbone est inférieure à 0,25 % pour toutes les températures supérieures à zéro degré.

A partir de 29 % de Ni, l'acier est austénitique, quelle que soit sa teneur en carbone.

b) *Les constituants des aciers alliés.*

Certains éléments comme le silicium, le nickel et le cobalt, peuvent donner, avec le fer, une solution solide, stable à froid.

Les autres éléments : le manganèse, le chrome, le tungstène, le vanadium, le molybdène, peu solubles, donnent naissance à des carbures solubles dans le fer γ à haute température, mais qui restent libres à basse température et confèrent au métal une dureté plus grande.

c) *Modification des transformations résultant de l'échauffement et du refroidissement.*

Les éléments d'addition, à l'exception du silicium et du cobalt, ralentissent les transformations nécessaires à la trempe ou au recuit.

1° A l'échauffement, la dissolution des carbures dans l'austénite est beaucoup plus lente que celle du carbone dans le fer γ : la durée du chauffage des aciers alliés doit être nettement plus élevée que celle des aciers au carbone et la température de chauffage est différente.

2° Au refroidissement, la transformation perlite en martensite est beaucoup plus lente. Aussi, la vitesse de trempe est-elle beaucoup plus faible. Les aciers dits *autotrempants* ont une vitesse critique de trempe qui correspond au refroidissement à l'air. Le refroidissement lent leur confère la texture martensitique ; le refroidissement rapide (trempe à l'eau) leur donne la texture austénitique : l'acier est devenu moins dur et plus malléable.

d) *Le grain des aciers alliés.*

Les éléments d'addition favorables à la formation de carbures (le chrome, le molybdène, le vanadium, le tungstène), limitent la grosseur du grain. Les aciers qui les contiennent sont donc peu sensibles à la surchauffe.

9° La macrographie.

La **macrographie** est un procédé de contrôle qui permet, à l'œil nu ou au moyen d'un faible grossissement, de mettre en évidence :

— les *procédés de fabrication* et d'en déterminer les défauts ;
— les *irrégularités de composition* ;
— l'*organisation de la cristallisation.*

Elle n'est guère utilisée que pour les aciers.

a) *Mode opératoire.*

La pièce à étudier est sciée, puis polie à la meule fine.

La surface est ensuite attaquée au moyen des réactifs suivants ·

1° **Acides.** L'un des acides suivants peut être utilisé :
— acide chlorhydrique concentré. Durée : 10 mn à froid ;
— acide chlorhydrique à 50 %. Durée : 2 h à 80° ;
— acide sulfurique à 20 %. Durée : 20 mn à 80°.

2° **Réactifs cuivriques.** Le fer se substitue au cuivre dans les sels cuivriques. Si l'on attaque avec une solution acide de sels cuivriques, le cuivre se dépose sur les surfaces attaquées. Il est ensuite enlevé par l'ammoniaque et les parties attaquées, cuivreuses, apparaissent en creux.

Composition d'une solution :
— Chlorure cuivrique : 1 g.
— Acide chlorhydrique : 2 cm^3.
— Acide picrique : 0,5 g.
— Eau : 10 cm^3.
— Alcool éthylique : 100 cm^3.

La pièce à examiner est plongée dans la solution si elle est de petites dimensions. Si la pièce est grande, le réactif peut être passé au pinceau. L'attaque est assez longue : elle dure plusieurs heures.

b) *Applications.*

1° **Mise en évidence des procédés de fabrication** (*fig.* 23).

La macrographie met en évidence la direction des fibres et renseigne sur la qualité des opérations de forgeage, sur la qualité des soudures, sur les épaisseurs cémentées et, très approximativement, sur l'homogénéité des traitements thermiques.

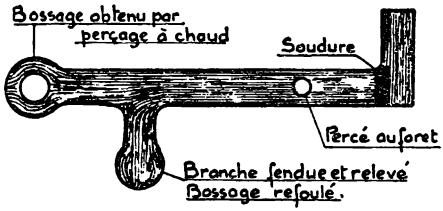


Fig. 23. — Macrographie d'une pièce forgée.

2° **Irrégularités de composition.**

La macrographie décèle très nettement la présence de scories, de soufflures et d'impuretés, telles le soufre et le phosphore, qui s'accumulent, au moment de la solidification, au voisinage de la retassure.

3° **Organisation de la cristallisation.**

Les réactifs cuivriques mettent en évidence la structure cristalline, et permettent de juger de son hétérogénéité lorsqu'il s'agit de produits bruts de coulée.

10° La radiométallographie.

La **radiométallographie** est une technique semblable à la radiographie médicale.

Elle utilise les propriétés relatives à l'absorption par les corps :

a) Des **rayons X**, radiations provenant du choc, dans le vide, d'un faisceau d'électrons rapides sur une plaque de tungstène servant d'obstacle.

b) Des **rayons** γ obtenus à partir de corps radioactifs : Cobalt 60 — Iridium 192 — Thulium 170 — Cæsium 137.

Les rayons γ sont beaucoup plus pénétrants que les rayons X et permettent d'explorer de plus fortes épaisseurs (jusqu'à 25 cm dans l'acier).

a) *Mode opératoire.*

Les pièces sont disposées devant l'appareil émetteur. Sur un écran placé derrière la pièce apparaît, en foncé, l'image de cette pièce. S'il y a une soufflure, l'épaisseur traversée par les rayons étant moindre, une tache *plus claire* se dessine.

Il est possible de remplacer l'écran par une plaque photographique.

Il est évident que les précautions habituelles doivent être prises pour protéger l'opérateur.

b) *Applications.*

La radiométallographie est de plus en plus utilisée pour le contrôle des pièces de fonderie, de forge, de laminage.

On a organisé des chaînes de contrôle en série dans les usines de construction de matériel aéronautique.

Étude des traitements thermiques

LES PRINCIPAUX TRAITEMENTS THERMIQUES

Les principaux traitements thermiques : la trempe, le revenu, le recuit, le vieillissement et les traitements thermochimiques (la cémentation, la malléabilisation, la nitruration, la sulfinisation, la carbonitruration), ont pour objet de modifier les caractéristiques mécaniques et les propriétés des métaux. Tous ces traitements sont étroitement liés aux transformations internes qui résultent de l'échauffement du métal à une température supérieure au point de transformation.

Le tableau résumant le mode opératoire des traitements thermiques appliqués aux alliages ferreux et les modifications des caractéristiques correspondantes le démontre.

PRINCIPAUX TRAITEMENTS THERMIQUES

NOM	MODE OPÉRATOIRE	MODIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES
Trempe	Chauffer la pièce à une température T appelée *température de trempe*. Puis refroidir rapidement, par immersion dans un fluide : air, eau, gaz. La température T est supérieure à la température A_{c_3} du point de transformation.	Résistance $(R_r)_e >$ Dureté $H >$ Allongement % $A\ \% <$ Résilience $K <$ A % caractérise la malléabilité du métal.
Revenu Ne s'applique qu'aux aciers trempés.	Chauffer la pièce à une température *t* plus faible que la température de trempe, et la laisser refroidir, lentement de préférence. Noter que $T < A_{c_3}$.	$(R_r)_e <$ $H <$ $A\ \% >$ $K >$
Recuit	Chauffer le métal à une température T_1 supérieure ou au moins égale à la température de trempe. Refroidir lentement : refroidissement dans le four, portes fermées, ou dans du sable. Noter que $T_1 > A_{c_3}$.	$(R_r)_e <$ $H <$ $A\ \% >$ $K >$ Noter que le recuit supprime : *a*) les effets de la trempe, *b*) l'écrouissage, *c*) les tensions internes.
Vieillissement	Laisser le métal à l'air libre pendant plusieurs mois, ou le chauffer à 200° plusieurs centaines d'heures.	Suppression des tensions internes résultant d'un forgeage, d'un usinage à l'outil ou à la meule ou faisant suite à un refroidissement rapide (pièces coulées ou trempées).

PRINCIPAUX TRAITEMENTS THERMIQUES (*suite*)

NOM	MODE OPÉRATOIRE	MODIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES
Cémentation	Opération qui permet de transformer en acier dur l'extérieur des pièces qui sont en acier doux. Placer les pièces en contact avec du cément (corps riche en carbone) dans des caisses si le cément utilisé est solide, dans un creuset si le cément utilisé est liquide. Chauffer à T = 900°. T > A_{c3} de l'acier doux. Maintenir en température : — 2 à 3 h pour le cément liquide, — 8 à 10 h pour le cément solide.	La couche extérieure des pièces, étant transformée en acier dur sur une épaisseur de 1 mm environ, peut être trempée et acquérir ainsi une grande dureté (double trempe). L'intérieur, qui reste en acier doux, a une grande résilience.
Malléabilisation Ne s'applique qu'à certaines fontes blanches.	Traitement ayant pour but de donner de la malléabilité et de la résistance aux pièces coulées en fonte blanche. Les pièces sont mises dans des caisses contenant des oxydes de fer (procédé européen), des scories ou des corps neutres (procédé américain). La chauffe à 900° ou 950° comprend : une chauffe de 36 h, un maintien en température de 72 h, et un refroidissement de 36 h.	Les pièces de formes compliquées sont coulées en fonte blanche. Pour les pièces minces, traitées par le procédé européen, le métal est transformé en acier. Pour les pièces épaisses, traitées par le procédé américain, il se produit un recuit de la fonte. Dans les deux cas, le métal est devenu plus résistant, plus résilient, et plus malléable.
Nitruration Ne s'applique avantageusement qu'aux aciers et fontes spéciaux, contenant de l'aluminium et du chrome.	Durcissement de la surface des pièces, par l'action de l'azote. Mettre les pièces dans une caisse étanche, où arrive un courant de gaz ammoniac. Chauffer à 520° entre 60 et 90 h. Refroidir lentement.	L'épaisseur de la couche durcie est de 0,5 à 1 mm. Pour obtenir le durcissement, il est inutile de tremper : dureté bien supérieure à celle des aciers trempés. Ce traitement peut s'appliquer sur des pièces déjà usinées.
Sulfinisation S'applique à tous les aciers et fontes.	Augmentation de la résistance à l'usure par l'action combinée du soufre, de l'azote et du carbone. Immersion des pièces dans un bain de sels portés à 570° comprenant du cyanure de sodium et du sulfite de sodium. Durée de l'opération : 1 à 3 h. Refroidir lentement.	La couche extérieure a une excellente résistance à l'usure sans augmentation de la dureté superficielle. Épaisseur de la couche traitée : de 0,15 à 0,3 mm. Il est possible de rectifier les pièces après traitement.
Carbonitruration S'applique aux alliages ferreux et plus particulièrement aux aciers.	Chauffer la pièce à une température comprise entre 750 et 850°, dans une atmosphère comprenant de l'oxyde de carbone (gaz d'éclairage ou carbure d'hydrogène craqué) et du gaz ammoniac. Durée du chauffage : 2 à 3 h. Trempe à l'huile pour durcir la surface extérieure.	La couche extérieure est durcie grâce à l'action combinée du carbone et de l'azote. L'épaisseur durcie est assez faible (0,5 mm). La résistance à l'usure est grande. Une trempe à l'huile étant suffisante, les déformations de la pièce sont minima.

MESURE DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Nous venons de voir que tout traitement thermique comporte un chauffage à une température déterminée.

Il est admis sans discussion possible que la *réussite d'un traitement thermique dépend de la précision du contrôle des températures.* Aussi a-t-on vu se substituer aux méthodes d'évaluation empirique des températures, des mesures précises qui nécessitent l'emploi de *pyromètres.*

A. — Méthode empirique d'évaluation des températures

1° Basses températures (de 200 à 350°).

La couleur des oxydes métalliques qui recouvrent les pièces préalablement décapées à la lime donne une indication sur la température du métal.

Principales couleurs et températures correspondantes :

Jaune pâle 215°.	Gorge de pigeon 255°.	Bleu 315°.
Jaune foncé 230°.	Violet 275°.	Vert 340°.

2° Températures moyennes.

Utilisation des phénomènes calorifiques qui se produisent au contact, avec la pièce chauffée, d'une petite baguette de peuplier ou de sciure de bois blanc.

1° **Essai obtenu en mettant en contact une baguette de peuplier avec une pièce chauffée.**

Bois glissant, 400° ; Bois étincelant, 525° ;
Bois fumant, 450° ; Bois flambant, 550°.

2° **Essai obtenu en jetant une poignée de sciure de peuplier sur la pièce chauffée.**

300°, dégagement léger de fumée ;
350°, dégagement moyen de fumée ;
400°, dégagement instantané de fumée sans points rouges ;
450°, dégagement de fumée avec points de combustion rouges ;
500°, combustion vive.

Températures élevées.

La couleur de la pièce renseigne sur sa température :

Rouge naissant, (n'apparaît que dans l'obscurité) ;	500°	Jaune,	1 100° ;
		Jaune clair,	1 200° ;
		Blanc,	1 300° ;
Rouge sombre,	600° ;	Blanc éclatant (encore appelé blanc soudant) ;	1 400°
Rouge,	700° ;		
Rouge cerise naissant,	800° ;		
Rouge cerise,	900° ;	Blanc éblouissant	1 500°.
Rouge cerise clair,	1 000° ;		

Ces méthodes d'évaluation des températures n'ont rien d'absolu. *Elles sont fonction de l'opérateur* et risquent d'entraîner des erreurs pouvant atteindre 100 à 150°. Si elles rendent des services pour certains travaux de forgeage ou pour le traitement thermique de quelques pièces chauffées au feu de forge, *elles sont à proscrire pour tout traitement thermique sérieux.*

B. — Mesure précise des températures : les pyromètres

La mesure des températures ne pouvant être directe, *se traduit par la mesure d'une grandeur qui varie d'une façon continue avec la température.*

1° Mesure d'une force électromotrice.

Pyromètre à couple thermo-électrique et lunette de Féry à radiation totale.

2° Comparaison de l'intensité ou de la couleur des radiations lumineuses.

Pyromètre optique à disparition de filament.

3° Mesure d'une longueur représentant la dilatation d'un solide.

Pyromètre à dilatation.

4° Observation du début de fusion d'un corps.

Cônes ou montres fusibles de Séger.

a) *Couple thermo-électrique.*

Considérons deux fils de métaux différents : *fer* et *constantan* (alliage de 60 % Cu et 40 % Ni), dont les extrémités sont torsadées, puis soudées par fusion à l'arc électrique (*voir fig.* 1).

Si l'une des soudures est portée à une température T, supérieure à celle de l'autre, t, on constate le passage dans les conducteurs d'un courant électrique i produit par une force électromotrice qui augmente avec la différence $(T - t)$ des températures.

En outre, si l'on intercale un galvanomètre dans le circuit, l'appareil et les fils de liaison restant à la même température t, la force électromotrice ne change pas (*fig.* 2).

Le galvanomètre mesure la force électromotrice qui est proportionnelle à la différence $(T - t)$ des températures de la « soudure chaude » et de l'appareil.

Si t est supposée constante, les indications du galvanomètre sont proportionnelles à T et, pour avoir une lecture directe de la température, il suffit de graduer l'appareil en degrés.

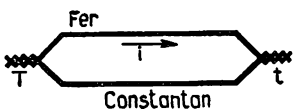


Fig. 1. — Schéma de principe d'un couple thermo-électrique.

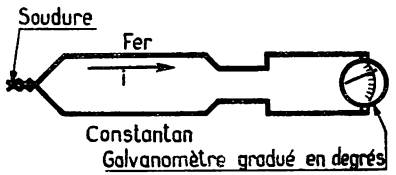


Fig. 2. — Schéma de principe d'un pyromètre à couple thermo-électrique.

b) *Canne pyrométrique Le Chatelier.*

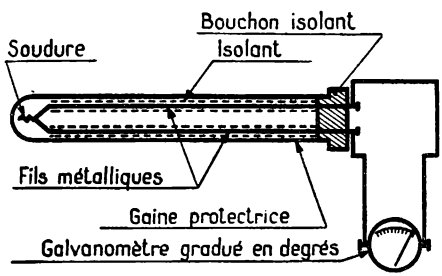


Fig. 3. — Schéma d'une canne pyrométrique.

Dans l'appareil utilisé industriellement, les deux fils de nature différente qui constituent le couple thermo-électrique sont isolés et enfilés dans une gaine protectrice (*fig.* 3).

Ils sont terminés par deux bornes où viennent se brancher les cordons du galvanomètre.

La gaine montée qui constitue la canne pyrométrique est placée dans le four dont on veut mesurer la température.

Les principaux couples sont :

a) **Fer-constantan,** pouvant être utilisé jusqu'à 800°. Les fils sont isolés à l'amiante et disposés dans une canne en acier inoxydable.

b) **Nickel-chrome,** utilisable jusqu'à 1 100°, avec gaine en acier inoxydable.

c) **Chromel** (90 % Ni, 10 % Cr) **alumel** (94 % Ni, 3 % Mn, 2% Al, 1 % Si), utilisable jusqu'à 1 200°, avec gaine en acier inoxydable.

d) **Platine-platine rhodié** (alliage de platine et 10 % de rhodium), utilisable de 700 à 1 450°.

e) **Platine rhodié** à 20 % de rhodium et **platine rhodié** à 40 % de rhodium, utilis de able700 à 1 800°.

Pour ces deux appareils, les gaines peuvent être constituées par de la silice pure (*quartz*) ou de la porcelaine silico-alumineuse.

L'appareil de mesure est un galvanomètre à cadre mobile qui doit être placé dans une position verticale ou horizontale. La lecture des températures est obtenue par une aiguille qui se déplace devant un cadran gradué.

Précautions à prendre pour l'emploi des cannes pyrométriques.

Les indications du galvanomètre peuvent être faussées :

1° Par les variations de résistance des fils qui réunissent l'appareil au couple. Il y a donc lieu de vérifier soigneusement les contacts aux bornes de liaison des conducteurs avec les appareils et de *n'utiliser que les cordons livrés avec le galvanomètre.*

2° Par la variation de température de la soudure froide.
Aussi faut-il éviter le plus possible la transmission de la chaleur aux cordons et au galvanomètre. C'est pourquoi l'orifice de pénétration de la gaine dans le four doit être le plus petit possible pour éviter toute transmission de chaleur par rayonnement. L'appareil de mesure doit être placé le plus loin possible du four, la canne n'étant introduite dans le four que de 10 à 20 cm car la partie active du couple, la soudure chaude, est disposée à l'extrémité de la gaine.

Lorsque la gaine est en porcelaine ou en quartz, se souvenir qu'il s'agit de matériaux très fragiles et très sensibles aux variations de température. Si le four est chauffé au gaz ou au mazout, il est donc conseillé de n'enfiler la canne que lorsque le four est allumé, afin d'en éviter la rupture au moment de l'explosion que provoque l'allumage. D'autre part, il ne faut retirer la canne que lorsque le four est complètement refroidi ; sans cela, la brusque variation de température amènerait une contraction trop rapide de la gaine qui se briserait. Le même résultat serait obtenu si l'on introduisait l'appareil dans un four déjà chaud.

c) *Lunette de Féry à radiation totale.*

L'appareil comporte un couple thermo-électrique très sensible ; son galvanomètre est gradué en températures. Le couple se trouve dans une boîte cylindrique, à l'intérieur de laquelle un miroir parabolique percé en son centre peut se déplacer parallèlement à lui-même, derrière le couple (*fig.* 4).

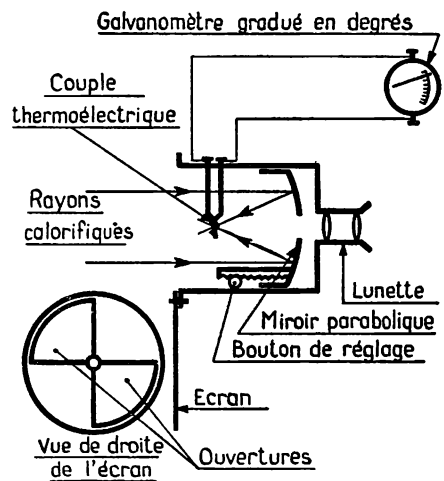


Fig. 4. — Schéma d'une lunette de Féry.

L'appareil repose sur un trépied analogue à ceux utilisés en photographie, à 2 mètres environ du four, face à la porte qui est entrouverte ou au droit du *trou de regard.*

A l'aide de la lunette, on le dirige sur la pièce dont on veut mesurer la température. On règle la position du miroir pour que l'image de la pièce soit confondue avec celle du couple.

Les rayons calorifiques, émis par la pièce chaude, viennent frapper le miroir et sont concentrés sur le couple dont la température augmente. Cette augmentation, proportionnelle à la température de la pièce, est enregistrée par le galvanomètre. Un écran obturant la moitié du passage des rayons calorifiques permet d'utiliser, pour les hautes températures, une deuxième graduation du galvanomètre.

La lunette de Féry, qui peut être utilisée à partir de 600°, n'est pas d'une très grande précision.

d) *Lunette à disparition de filament.*

Elle est constituée par une lunette au moyen de laquelle on observe, à travers un écran de verre rouge, l'image des pièces placées dans le four et, en même temps, celle du filament d'une lampe montée dans le circuit électrique d'une pile ou d'un accumulateur (*fig.* 5 et 6).

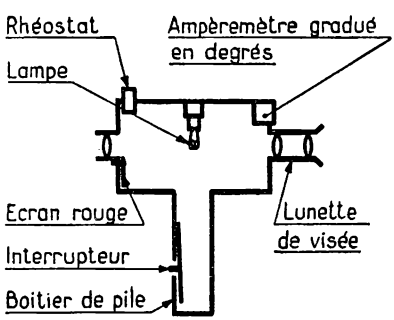


Fig. 5. — Coupe schématique d'une lunette à disparition de filament.

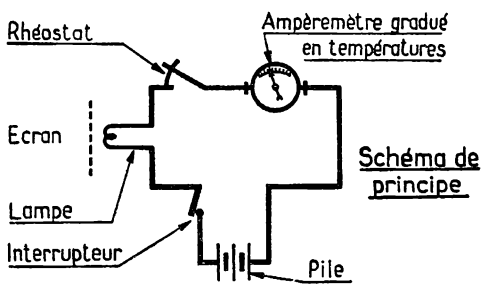


Fig. 6. — Schéma de principe d'une lunette à disparition de filament.

Un rhéostat, disposé en série avec la lampe, permet de faire varier l'intensité du courant et, par suite, la *brillance* du filament. Un ampèremètre, gradué en températures, mesure l'intensité du courant. Si la brillance du four est supérieure à celle du filament, ce dernier apparaît en noir sur l'image de la pièce. Dans le cas contraire, il apparaît comme un fil plus brillant. On règle le rhéostat de façon à égaler les deux brillances ; alors l'image du filament disparaît. La température de la pièce est lue directement sur le cadran de l'ampèremètre.

Cet appareil, portatif lorsqu'il est équipé avec des piles, est très précis et peut être utilisé à partir de 800° jusqu'à 2 500°. L'ampèremètre comporte deux graduations correspondant au réglage avec ou sans écran.

Il se place à n'importe quelle distance de la pièce chaude.

e) *Pyromètre à dilatation.*

Il utilise les variations de longueur d'un barreau en métal spécial, placé dans une gaine de silice. Celle-ci s'introduit dans le four comme la canne pyrométrique. Le métal, en se dilatant, produit le déplacement d'une aiguille qui enregistre la température par l'intermédiaire d'un petit levier (*fig.* 7).

Le pyromètre à dilatation, qui peut être employé de 200 à 1 000°, présente le double inconvénient de ne pas permettre la lecture à distance et d'être assez fragile.

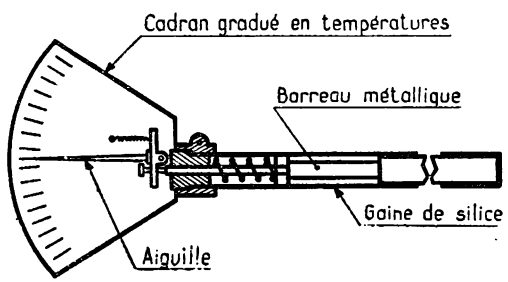


Fig. 7. — Pyromètre à dilatation.

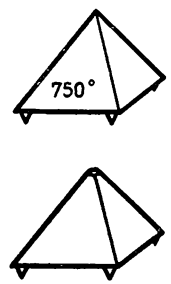


Fig. 8. — Pyramides fusibles.

f) *Pyramides ou montres fusibles de Séger.*

Elles sont constituées par de petites pyramides triangulaires en porcelaine, en terre ou en sels, fondant à des températures déterminées, espacées de 25 en 25° (*fig.* 8).

Elles sont composées de mélanges de kaolin, carbonate de chaux et oxyde de fer ou de plomb.

Pour observer la température, on en place quelques-unes dans le four par ordre de fusibilité. A mesure que la température augmente, on voit le sommet de chaque montre s'affaisser et s'arrondir.

Rarement, elles sont employées pour suivre la température dans les fours de traitements thermiques. Mais, le plus souvent, on les utilise en émaillerie ou dans l'industrie céramique.

g) *Contrôle des pyromètres.*

Les pyromètres sont des appareils délicats qui doivent être fréquemment contrôlés. Pour ce contrôle, on emploie une canne étalon ou un appareil à disparition de filament. On peut également utiliser des bains métalliques dont on connaît le point de fusion ou d'ébullition.

CHAUFFAGE DES PIÈCES : LES FOURS

A. — Généralités

Le chauffage des pièces pour les traitements thermiques peut se faire au *feu de forge* ou dans des *fours*. La chauffe au feu de forge est à éviter, car aucun contrôle de température n'est possible et l'atmosphère, souvent oxydante, cause une *décarburation* du métal.

Industriellement, la chauffe se fait dans des fours ou, s'il s'agit de chauffe locale, au moyen de chalumeaux à gaz oxyacétylénique ou de fours à courants de haute fréquence.

Il existe *deux sortes de fours* :

— 1° Les fours où le véhicule de la chaleur est l'air ou les gaz de combustion : *fours à atmosphère.*

— 2° Les fours où le véhicule de la chaleur est un métal ou un sel en fusion : *fours à bain liquide.*

B. — Fours à atmosphère

On distingue les **fours fixes** et **les fours basculants** qui peuvent être utilisés pour le chauffage de pièces, soit lourdes, soit de grande longueur.

Les fours comprennent une ou plusieurs *chambres en briques réfractaires* (silicate d'alumine), scellées par un coulis réfractaire (mélange d'argile cuite et d'argile crue).

La *sole* du four est le plus souvent exécutée en briques spéciales à base de carbure de silicium.

Le *ciel* de la chambre est constitué par une brique de grande dimension moulée spécialement, ou par un assemblage de briques réfractaires disposées en forme de voûte.

Pour éviter toute déperdition de chaleur, on prévoit un revêtement calorifuge en briques de silice poreuse, ou en laine minérale (verre filé) pour les fours électriques. La forme donnée aux fours dépend surtout de leur mode de chauffage.

1° Fours à combustibles solides.

Fours à charbon, à coke. Pour disposer d'une marche continue, il sont souvent pourvus d'un brûleur à charbon.

Sur la *figure* 9, remarquer la forme de la voûte, prévue pour guider les gaz de combustion et réfléchir les rayons calorifiques sur la sole.

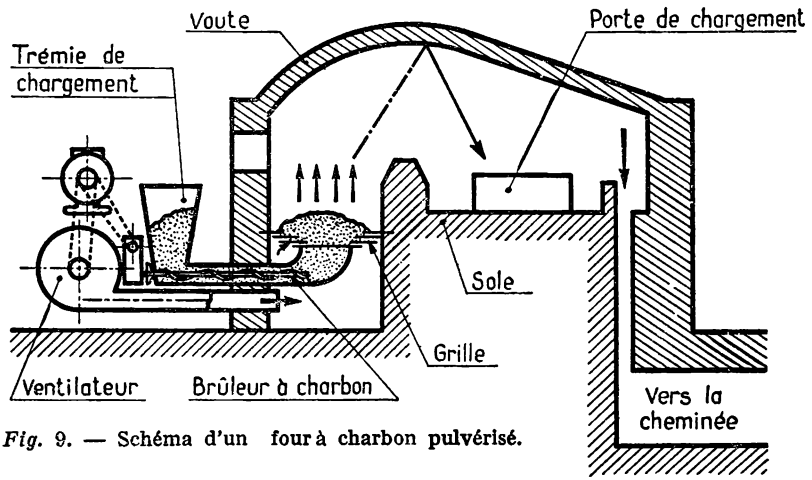


Fig. 9. — Schéma d'un four à charbon pulvérisé.

2° Fours à combustibles liquides ou gazeux.

Les premiers (*fig.* 10) utilisent le mazout, les seconds (*fig.* 11) le gaz d'éclairage, de haut fourneau ou de gazogène.

Le mélange du combustible et de l'air parvient dans le four au moyen d'un brûleur à la sortie duquel il est enflammé.

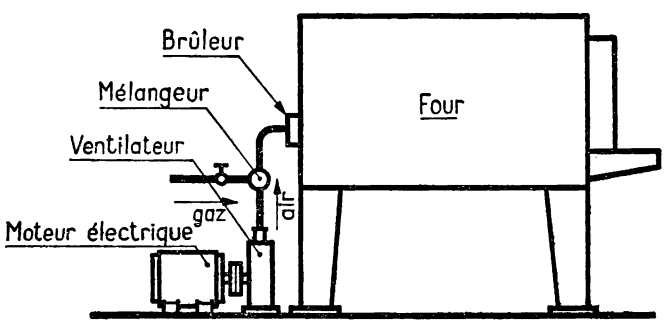


Fig. 10. — Schéma de montage d'un four à gaz.

L'air nécessaire à la combustion doit être surpressé au moyen d'un ventilateur ou d'un compresseur. Les *figures* 10 et 11 donnent le schéma des canalisations à prévoir pour l'installation d'un four à gaz et d'un four à mazout.

Les fours à combustible solide, liquide ou gazeux peuvent être *à chauffage direct* lorsque les gaz de la combustion entrent en contact avec les pièces à chauffer.

La *figure* 12 représente un four à gaz à une chambre de chauffage.

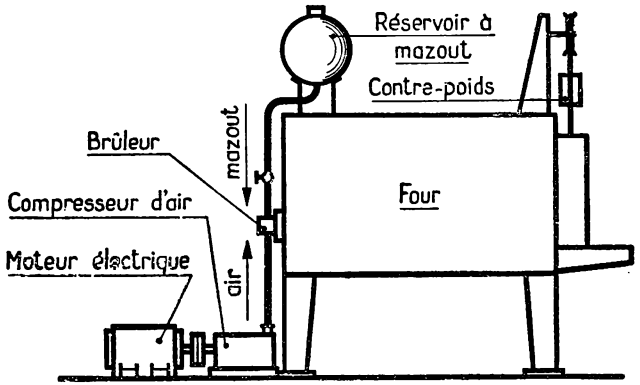


Fig. 11. — Schéma de montage d'un four à mazout.

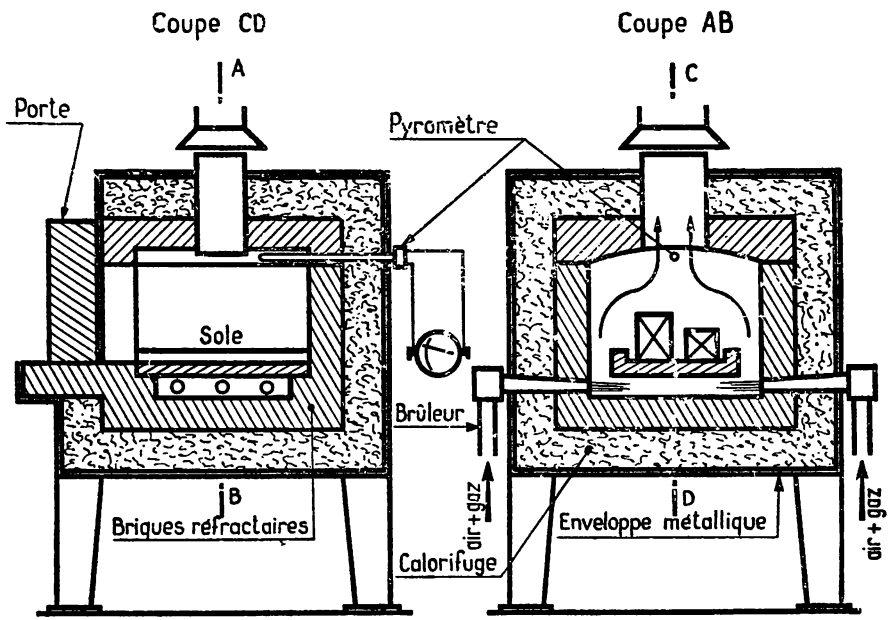


Fig. 12. — Four à gaz à une chambre de chauffage.

La *figure* 13 représente un four à gaz à deux étages pour le traitement de l'acier rapide. Les brûleurs chauffent des débris de briques réfractaires qui rayonnent de la chaleur. La voûte concentre les rayons calorifiques sur la sole.

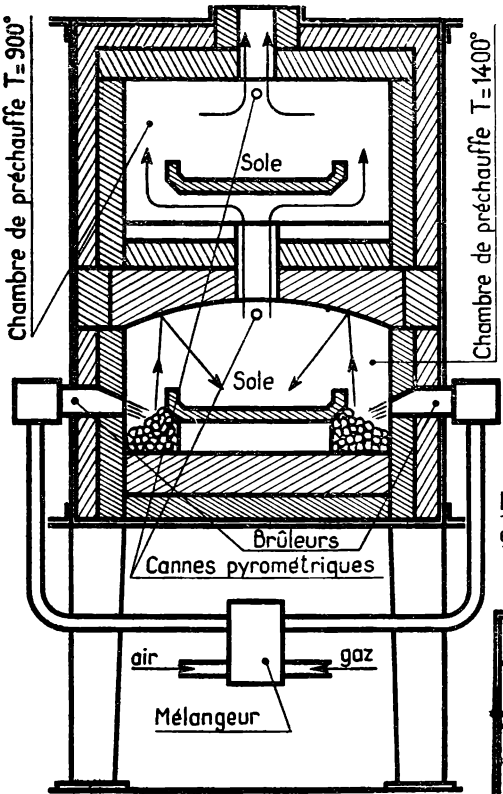


Fig. 13. — Four à gaz à deux chambres de chauffage.

Le contact des gaz de combustion avec les pièces a pour inconvénient de décarburer ou d'oxyder le métal et de l'altérer, si le combustible contient du soufre. D'autre part, le chauffage n'est pas toujours très régulier.

Aussi pratique-t-on souvent le chauffage indirect, en disposant les pièces dans un caisson réfractaire appelé *moufle* (*voir fig.* 14).

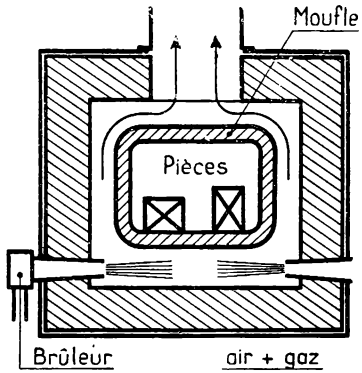


Fig. 14. — Schéma d'un four à moufle.

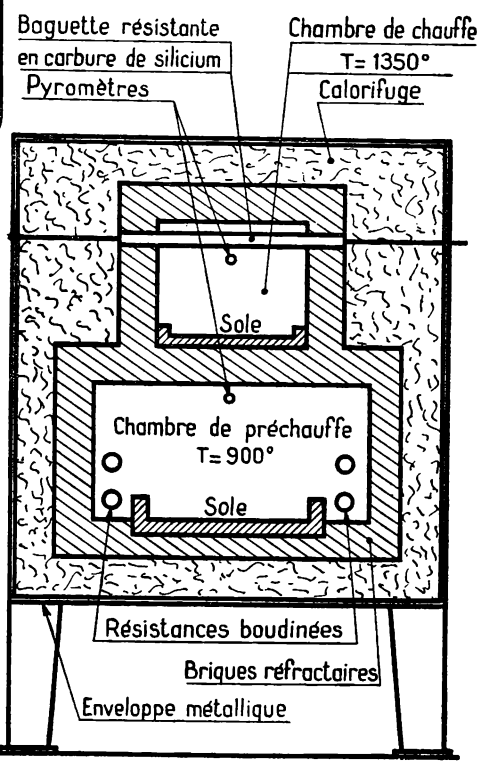


Fig. 15. — Four électrique à deux chambres et à résistances apparentes. →

3° Fours électriques.

On distingue les *fours à résistances* et les *fours à circulation calorifique forcée.*

Dans les premiers, les plus utilisés, les résistances peuvent être *apparentes* (*fig.* 15) ou *noyées* (*fig.* 16).

Les résistances en alliage de nickel-chrome fonctionnent le plus souvent jusqu'à des températures comprises entre 800 et 1 000°.

Pour des températures supérieures, on utilise des baguettes de graphite ou de carbure de silicium.

Le fonctionnement des fours électriques se révèle très sûr pour les températures inférieures à 800° : pour le traitement des alliages d'aluminium, on utilise presque toujours des fours électriques.

Les parois du four peuvent être métalliques pour des températures inférieures à 500° (calorifugeage en laine minérale).

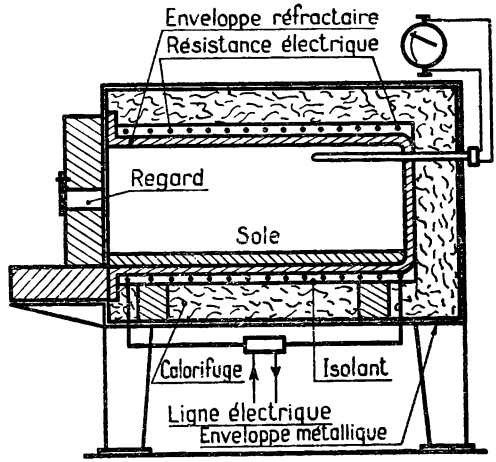


Fig. 16. — **Four électrique horizontal à résistances noyées.**

Les fours à circulation calorifique forcée ont été créés surtout pour le traitement des alliages d'aluminium, afin d'obtenir en tous les points du four une température aussi constante que possible (± 2°C).

La *figure* 16 *bis* représente un type de four vertical pouvant fonctionner jusqu'à 700°.

Un ventilateur communique à l'air du four un mouvement suivant le circuit tracé par des flèches en trait plein. L'air passe, à grande vitesse, sur des résistances chauffantes et sur les pièces. Le circuit d'air est inversé à intervalles réguliers.

Ce genre de four peut être utilisé pour la cémentation gazeuse.

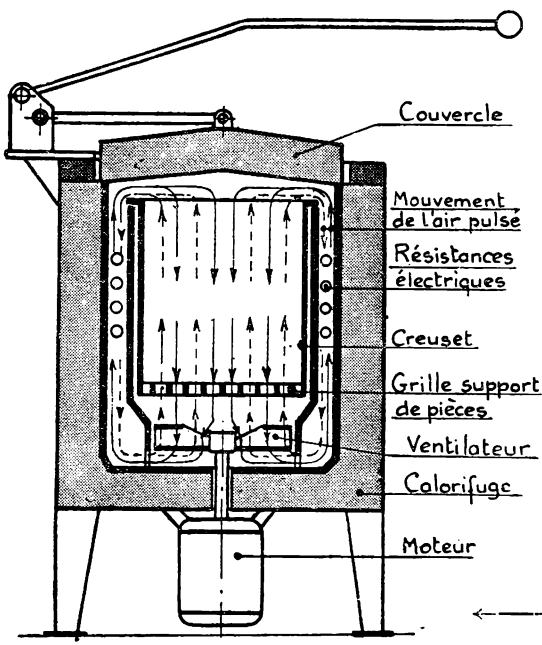


Fig. 16 *bis.* — **Four électrique vertical à circulation forcée.**

C. — Fours à bain liquide

Les fours à bain liquide sont constitués par un creuset en fonte, ou en acier inoxydable soudé et embouti, ou en graphite. Le creuset peut être chauffé au coke, au mazout, au gaz, ou à l'électricité. Les bains employés sont, suivant les températures désirées : de l'étain, du zinc, du plomb fondu ou des sels nitrites et nitrates qui ont été amenés à la fusion. Parmi les sels, de compositions très diverses, certains peuvent même être utilisés pour la trempe de l'acier rapide à 1 300°.

La *figure* 17 donne le schéma d'un four à gaz. Remarquer la disposition tangentielle des brûleurs et la forme de la canne pyrométrique.

Les fours électriques sont le plus souvent des fours à électrodes plongeant dans le bain (*voir fig.* 17 *bis*).

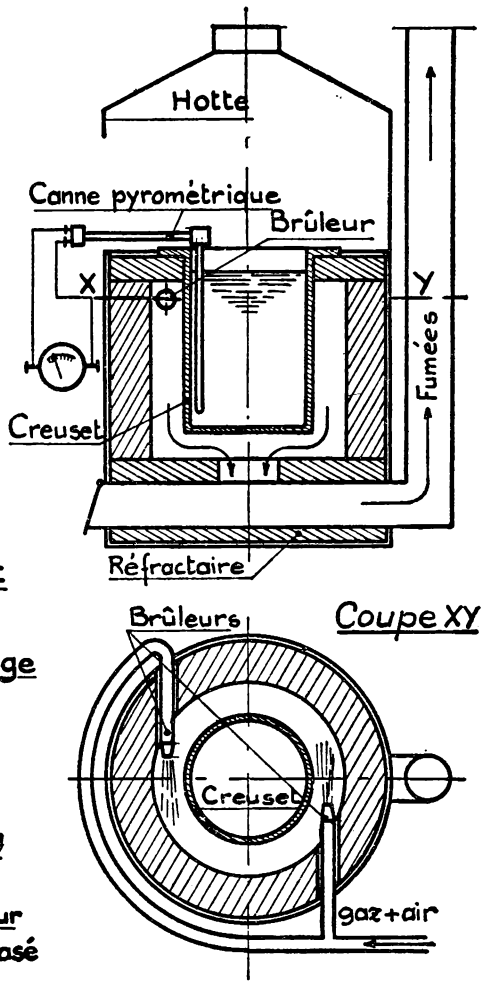


Fig. 17. — Four à bain liquide chauffé au gaz.

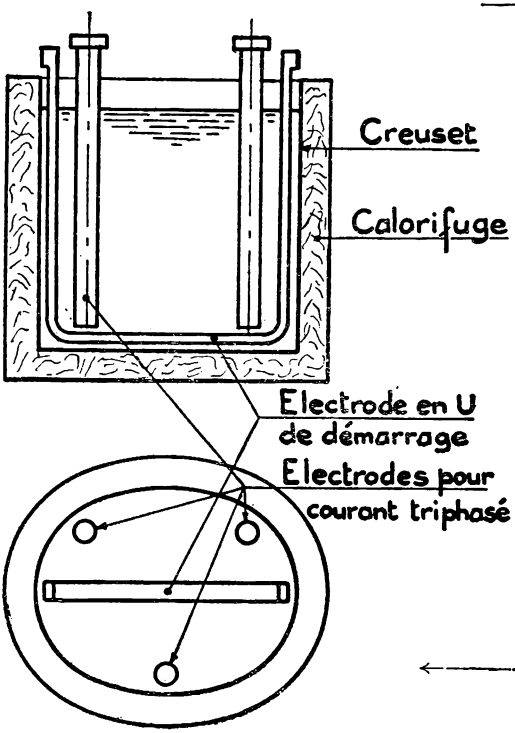


Fig. 17 *bis.* — Four électrique à bain de sel.

Au démarrage, le sel solidifié est porté à la fusion par le passage du courant dans une électrode en U. Les électrodes plongeantes sont ensuites mises sous tension et le courant traversant le sel liquide fournit les calories nécessaires pour porter et maintenir le bain à la température de fonctionnement.

La hotte prévue sur ces fours pour l'évacuation des vapeurs nocives n'est pas indispensable pour les fours de cémentation. Pour conserver leur efficacité, les bains de cémentation présentent, en surface, une croûte sursaturée en carbone, dont la présence constante empêche la décomposition du bain. Cette couche ne peut se former qu'au contact de l'air froid.

D. — Régulation de la température

Les fours modernes sont équipés avec des régulateurs dont le rôle est de maintenir la température T du four entre deux limites, T_1 et T_2, aussi rapprochées que possible : $T_1 - T_2 = 5$ à 10° environ.

Le régulateur, qui exerce son action sur le système d'apport de calories, est commandé par le couple thermo-électrique. Il agit :

— **pour les fours à combustibles solides,** sur le registre d'entrée d'air ;

— **pour les fours à combustibles liquides ou gazeux,** à la fois sur les vannes d'arrivée de combustible et sur celles d'arrivée d'air ;

— **pour les fours électriques,** sur l'arrivée de courant : le circuit électrique est coupé lorsque $T = T_1$, et rétabli lorsque $T = T_2$.

La marche des fours peut être suivie d'un poste central de commande, grâce à un système de lampes de signalisation et à un thermomètre enregistreur.

LA TREMPE

A. — Définition

La trempe est un traitement thermique qui comprend :

1° **Le chauffage du métal** à une température supérieure au point de transformation A_3.

2° **Le maintien en température** pour permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse.

3° **Le refroidissement** rapide à une vitesse supérieure à la vitesse indispensable à la formation de martensite et inférieure à la vitesse qui laisserait subsister une proportion trop importante d'austénite.

Le refroidissement a lieu par immersion des pièces dans un fluide.

Un tel traitement modifie très sensiblement les caractéristiques mécaniques du métal.

D'une façon générale, on admet que :

a) la résistance à la rupture $(R_r)_e$ a *augmenté*,

b) la contrainte de limite élastique (R'_e) a *augmenté*,

c) la dureté HB a *augmenté*,

d) l'allongement A % a *diminué*,

e) la résilience K a *diminué*.

EXEMPLE.

DÉSIGNATION	ÉTAT	$(R_r)_e$ EN N/mm^2	(R'_e) EN N/mm^2	HB BRINELL N/mm^2	A %	K EN J/cm^2
Acier doux 0,10 à 0,14 % de C	naturel	370	300	1 080	38	320
	trempé à l'eau	500	350	1 460	32	340
Acier demi-dur 0,4 à 0,5 % de C	naturel	650	400	1 900	18	120
	trempé à l'eau	1 900	1 600	5 600	2	10

NOTA. — Pour avoir $(R_r)_e$, (R'_e), HB en kgf/mm^2 et K en kgm/cm^2, diviser par 10 les nombres du tableau.

L'examen de ce tableau montre que, pour les aciers à faible teneur en carbone, les modifications apportées par la trempe sont faibles, surtout en ce qui concerne la dureté et la résilience. On constate également que la résilience des aciers doux recuits est légèrement augmentée par la trempe.

C'est ce qui a fait dire d'une façon impropre que les aciers doux ne prennent pas la trempe.

Remarquons que, dans quelques cas, les effets de la trempe sont contraires à ceux qui sont constatés couramment :

C'est le cas d'aciers auto-trempants (aciers au nickel-chrome : 4 à 6 % Ni; 1,5 à 3 % Cr; 0,1 à 0,4 % C) qui acquièrent, par refroidissement à l'air, une texture martensitique, mais qui s'adoucissent par trempe à l'eau en raison du maintien à froid de l'austénite.

De même, certains laitons et bronzes deviennent moins durs et plus malléables après trempe.

Mais ce sont là des exceptions.

L'examen d'éprouvettes cassées révèle que le métal trempé correctement présente des grains beaucoup plus fins et plus régulièrement disposés qu'ils ne l'étaient initialement.

B. — But de la trempe

1° Amélioration générale des propriétés mécaniques.

a) **Augmentation de la résistance à la rupture** pour les aciers de construction qui subiront, après trempe, un revenu à haute température.

b) **Augmentation de la limite élastique** : aciers à ressorts.

c) **Augmentation de la dureté** : pièces de frottement et outils.

d) **Diminution de la résilience** (aciers demi-durs, durs et fontes aciérées) : obus de rupture.

e) **Augmentation de la résilience** : acier doux de construction et aciers auto-trempants.

2° Régénération d'un métal surchauffé.

Un métal est dit surchauffé lorsqu'il a été porté trop longtemps à une température bien supérieure à son point de transformation.

Il présente une cristallisation grossière et ses caractéristiques sont ainsi très diminuées. Une trempe aura pour effet, en affinant son grain; de lui redonner des propriétés mécaniques maxima. Ce traitement pourra avantageusement être appliqué aux aciers doux et, particulièrement, aux aciers de cémentation.

C. — Étude de la chauffe

1 But à atteindre.

Porter le métal à une température supérieure au point de transformation A_{c3}. Pour être certain de parvenir au résultat cherché, on choisit, dans l'industrie, une température égale à A_{c3} + 50° environ.

Soit :

aciers XC 20	850 + 50 = 900°	aciers XC 70	735 + 50 = 785°.
aciers XC 50	750 + 50 = 800°	aciers XC 100	720 + 50 = 770°.

Pour les aciers spéciaux, se reporter aux températures préconisées par le métallurgiste.

2° Mode opératoire.

Au cours de l'échauffement, on doit éviter :

— **la déformation des pièces,**

— **la détérioration du métal, qui résulte :**

a) *des tapures* ou ruptures internes provenant des irrégularités de dilatation ;

b) *du changement de composition chimique* imputable à une oxydation ou à une décarburation superficielle.

a) *Comment éviter la déformation des pièces.*

Vers 700 ou 800°, le métal est devenu plastique. Si les pièces sont mal soutenues dans le four, ou reposent sur une sole irrégulière, elles peuvent se déformer.

Ces déformations subsisteront après refroidissement et pourront même se trouver amplifiées au cours de la trempe. Aussi doit-on étudier des supports appropriés pour la chauffe des pièces longues aux formes tourmentées.

b) *Comment éviter la détérioration du métal.*

L'étude des phénomènes physiques et chimiques, qui se succèdent au cours de la chauffe, va nous permettre de déterminer les conditions rationnelles du chauffage.

a) **Fragilité à chaud.**

L'expérience a montré qu'au cours de l'échauffement, les aciers deviennent très fragiles à certaines températures. En particulier, cette fragilité est maximum pour les aciers au carbone entre 300 et 400°. L'essai suivant permet de la mettre en évidence. Prenons une tôle douce recuite. Nous pouvons à froid la plier à bloc sans crique ni déchirure. Si, au contraire, nous la chauffons à 350° et la serrons dans l'étau, il devient impossible de la plier sous un angle de 90° sans la casser. Ce phénomène met en évidence la fragilité au bleu qui permet d'expliquer notamment la rupture des essieux de wagon lorsqu'un échauffement se produit en raison du manque de graissage.

Pour les aciers rapides, la zone de fragilité correspond à des températures de 700 à 750°. Elle est bien connue des outilleurs qui savent que ces aciers se cassent lorsqu'on les forge au rouge cerise naissant.

b) **Dilatation du métal.**

Tout corps chauffé se dilate. L'échauffement d'une pièce est plus rapide à l'extérieur qu'à l'intérieur, plus rapide aussi sur les parties minces que sur les parties épaisses. Les pièces étant placées dans un four très chaud, des inégalités de dilatation vont se produire : des forces intérieures tendront à empêcher ces dilatations. Ces forces, nommées tensions internes, risquent de provoquer le décollement des parties extérieures ou la rupture de la pièce au raccordement des parties minces avec les parties massives.

Pour éviter ces ruptures internes ou tapures qui peuvent n'être révélées qu'à l'usinage ou aux essais, voici quelles sont les précautions à prendre :

1° CHAUFFER LENTEMENT LE MÉTAL jusqu'à une température supérieure à la limite de fragilité, soit 450° pour les aciers au carbone, au chrome, au nickel, et 800° pour les aciers rapides.

2° CHAUFFER ENSUITE RAPIDEMENT jusqu'à la température de trempe. D'où la nécessité, si l'on pratique la trempe continue, d'utiliser un four à deux étages chauffés à des températures différentes.

3° NE JAMAIS METTRE DIRECTEMENT LES PIÈCES FROIDES DANS UN FOUR TRÈS CHAUD. Il est nécessaire de dégourdir les pièces en les plaçant devant ou sur le four, dans le trajet des gaz chauds. C'est ainsi que l'on opère lorsqu'on trempe des outils à la forge à gaz ou à charbon.

4° UTILISER DE PRÉFÉRENCE DES FOURS A CHAUFFAGE INDIRECT ou à bains de sel, dont la température est plus homogène.

5° SI LES PIÈCES TREMPÉES DOIVENT AVOIR DE GRANDES DIFFÉRENCES DE SECTIONS, prévoir des *raccordements à grand rayon* (*fig.* 18).

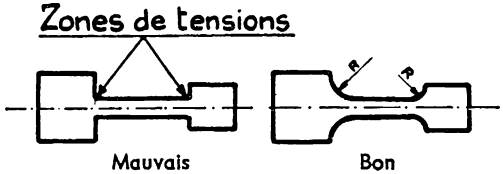


Fig. 18. — Forme à donner aux pièces trempées.

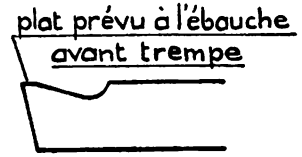


Fig. 19. — Forme à donner aux outils avant trempe.

c) **Oxydation ou décarburation.**

Les risques de modification de la composition du métal par oxydation ou décarburation sont d'autant plus intenses :

— *que la température de chauffe est plus élevée* ;
— *que le métal reste plus longemps à haute température* ;
— *que l'atmosphère du four est plus oxydante.*

La décarburation superficielle peut modifier notablement les propriétés des pièces traitées ; surtout la dureté après trempe, fonction de la teneur en carbone de l'acier.

Pour diminuer la *décarburation* et l'*oxydation* on peut :

1° ACTIVER LA DEUXIÈME PARTIE DU CHAUFFAGE : d'où la nécessité d'employer des fours convenablement calorifugés et à importante puissance de chauffe.

2° RENDRE NEUTRE OU MÊME RÉDUCTRICE L'ATMOSPHÈRE DES FOURS : d'où les diverses solutions, suivant le mode de chauffage :

a) *Fours à mazout ou au gaz* : donner un excès de combustible. Pour les fours à gaz, on se rend compte que l'atmosphère est réductrice quand les gaz de départ présentent une légère coloration bleue.

b) *Fours électriques* : mettre dans le four quelques morceaux de charbon de bois, une poignée de cément, ou faire arriver du gaz d'éclairage.

Dans les deux cas, laisser les portes du four bien closes et défourner rapidement au moment de la trempe.

Lorsque les pièces présentent des angles aigus avec arête vive, la légère oxydation inévitable produit nécessairement l'affaissement de cette arête. Aussi est-il recommandé de prévoir un léger plat ; l'acuité de l'angle s'obtiendra après trempe par meulage ou rectification : application à la trempe des outils de tour ou des outils de forme (*fig.* 19).

A noter également que l'on enduit d'un ciment spécial, à base d'amiante et de kaolin, certaines parties de pièces qui ne doivent ou ne peuvent pas être usinées à la meule après trempe.

EXEMPLES.

— Protection pour la trempe des parties moletées ;

— Protection des filetages exécutés sur des pièces devant subir des traitements thermiques.

c) *Fours à bain* : ces fours utilisent des bains métalliques (plomb, zinc) ou des sels complexes en fusion (nitrites, nitrates, chlorures, carbonate de potassium, de sodium, etc.).

Les bains métalliques peuvent être utilisés depuis leur point de fusion (plomb 330°, zinc 420°) jusqu'à 850° environ. Malheureusement, à haute (empérature, le métal s'oxyde rapidement et un gros déchet se produit.

Les bains de sel ont une gamme d'utilisation assez restreinte. On utilise plusieurs fours dont les creusets contiennent des sels différents.

L'emploi de ces fours limite au minimum les dangers d'oxydation et de décarburation des pièces. D'ailleurs, une légère addition de cément liquide dans le bain assure une carburation superficielle qui compense la décarburation résultant de l'oxydation au cours des manutentions.

D. — Maintien en température

Lorsqu'un métal est porté à une température supérieure au point A_{c3}, il se produit des transformations internes comportant notamment, pour les aciers, la dissociation du carbure de fer. Ces réactions ne sont pas instantanées et elles doivent intéresser toute la masse si l'on veut obtenir une trempe à cœur. Il est donc nécessaire :

1° Que toutes les parties des pièces soient réellement portées à une température supérieure à A_{c3} ;

2° Que la transformation, qui commence par les parties extérieures de la pièce, gagne toute la masse métallique.

Or, le pyromètre placé dans le four nous renseigne sur la température de l'atmosphère ou du bain et non sur celle des pièces.

Entre l'instant où le pyromètre marque la température désirée et celui où l'on va tremper le métal, il faut donc attendre 2 à 3 minutes pour les pièces minces, 10 minutes pour les grosses pièces.

Remarquons que ce temps doit être réduit au minimum afin d'éviter la décarburation, l'oxydation du métal et, dans le cas des pièces cémentées, la diffusion du carbone dans la masse, ce qui entraînerait un manque de dureté.

E. — Trempe proprement dite : étude du refroidissement

1° Généralités.

Une étude systématique des phénomènes physiques accompagnant le refroidissement va nous permettre de déterminer dans quelles conditions la trempe doit être faite, comment on doit choisir et utiliser les différents fluides.

Rappelons les modifications internes résultant du chauffage et du refroidissement :

1° Le chauffage a pour objet de mettre en solution le carbone dans le fer γ et, s'il s'agit d'aciers alliés, de mettre aussi en solution solide dans le fer γ les carbures des métaux alliés (carbures de Cr, Mn, W, Va, Mo) ou les métaux eux-mêmes : Si, Ni, Co.

Ces transformations se produisent entre les points A_{c1} et A_{c3}.

2° Lorsqu'on refroidit très lentement le métal chauffé, les transformations inverses se reproduisent et l'on retrouve les constituants de l'acier recuit : perlite et ferrite ou perlite et cémentite.

3° Par contre, si le refroidissement est rapide, la perlite ne peut se former et une solution de carbone dans du fer α apparaît : c'est la martensite, tandis que la ferrite et la cémentite se reforment. Ces transformations se produisent entre les points A_{r3} et A_{r1}, températures beaucoup plus basses que A_{c1} et A_{c3}. Elles sont accompagnées d'un dégagement de chaleur, surtout aux environs du point A_{r1}.

4° La plus petite vitesse de refroidissement correspondant à une dureté de trempe acceptable est appelée *vitesse critique de trempe.* Cette vitesse critique est fonction de la composition des métaux. Ainsi le nickel incorporé aux aciers diminue la vitesse de trempe. Donc, les aciers qui en contiennent peuvent se tremper avec des fluides comme l'huile ou l'air, réfrigérants moins énergiques que l'eau. D'autre part, les pièces massives en acier au nickel sont susceptibles de prendre la trempe même à cœur.

5° Si l'on refroidit trop rapidement le métal, l'austénite subsiste à froid : la trempe n'est pas parfaite. Cette imperfection risque de se produire avec certains aciers spéciaux.

6° Si la vitesse de refroidissement est inférieure à la vitesse critique, il y a formation de troostite et de perlite : la trempe est douce.

7° On peut obtenir une trempe correcte en refroidissant rapidement la pièce jusqu'à $A_{r1} + 50$ à 100°, et moyennement vite jusqu'à la température ordinaire.

8° Dans les pièces massives, l'intérieur se refroidit plus lentement que l'extérieur, toujours en contact avec le fluide de trempe. Donc, l'extérieur pourra être trempé sec et l'intérieur doux ou même non trempé. Le traitement thermique n'est donc pas homogène.

2° Les accidents de trempe : tensions internes, tapures, déformations.

Le refroidissement brusque du métal chaud immergé dans le fluide de trempe est accompagné d'une contraction. L'extérieur de la pièce se refroidissant plus vite que le cœur, il se produit une tension de la couche extérieure qui risque d'entraîner sa rupture. Ce phénomène se trouve considérablement amplifié par le passage de la pièce dans la zone de transformation A_{r3} à A_{r1} (400 à 250°) et plus particulièrement à la température A_{r1}, puisque les transformations se produisent avec dégagement de chaleur.

Si l'on suppose une pièce massive, l'extérieur pourra être à 200° quand l'intérieur atteindra 400° au début des transformations. Il y aura échauffement de l'intérieur qui mettra en extension la couche extérieure. Si la contrainte dépasse la résistance à la rupture, il se produit des fentes : ce sont les tapures.

Les tensions internes créées inévitablement par la trempe ont pour effet :

1° **De provoquer la rupture du métal.**
Des criques ou tapures, susceptibles de n'intéresser que la partie extérieure des pièces, peuvent se révéler ou se trouver amplifiées si la pièce est soumise à des chocs ou à des variations importantes de température. On a, par exemple, constaté la rupture de pièces plusieurs jours après la trempe, lorsqu'elles se sont trouvées dans un endroit soumis à la gelée.

2° **De provoquer la déformation des pièces.**
Ces déformations sont particulièrement importantes pour les pièces longues, comportant des sections différentes.

Les tapures et les déformations risquent de se produire vers 400° (température de transformation et zone de fragilité). Ces accidents sont d'autant plus à craindre que la vitesse de refroidissement est plus grande et la pièce plus massive, surtout si elle possède des changements de section importants.

3° Comment obtenir une trempe correcte.

En général, on recherche :
a) **Une dureté maximum.**
b) **Une trempe aussi homogène que possible.**
c) **Des tensions internes minima** qui ne provoquent ni tapures, ni déformations.

Il ressort de l'exposé précédent que ce triple but sera atteint si :

1° **Le refroidissement est très rapide jusqu'à une température légèrement supérieure à celle de transformation,** soit 400 à 300° pour les aciers au carbone et 650 à 600° pour les aciers rapides. La dureté de la pièce dépend uniquement de la vitesse de refroidissement pendant cette période.

La température doit ensuite baisser moins vite lorsque sa valeur correspond

à la zone de fragilité et à la température de transformation (A_{r1}). Les dangers de déformation et de tapure sont ainsi diminués.

2° **La vitesse de refroidissement,** obligatoirement supérieure à la vitesse critique de trempe, est choisie en tenant compte de la composition de l'alliage traité et de la forme des pièces. Elle conditionne le choix du fluide réfrigérant.

Ainsi une trempe à l'eau des aciers rapides entraîne irrémédiablement des tapures.

Les pièces à tremper doivent, autant que possible, présenter des formes simples, sans brusques changements d'épaisseur où pourraient se localiser des tensions internes.

Une pièce comportant des différences de section importantes se trempe à vitesse modérée, dans l'huile par exemple, si l'on veut éviter toute déformation ou crique dans la zone de raccordement.

3° **Le fluide de trempe baigne également toutes les parties de la pièce,** de façon à provoquer un refroidissement uniforme. D'où la nécessité de provoquer le déplacement relatif de la pièce et du fluide.

L'agitation des pièces dans le bain de trempe rompt, en outre, la couche de vapeur et accélère les échanges de chaleur par convection.

Le mouvement imprimé aux pièces doit tendre à donner une trempe homogène et à éviter toute déformation. Le mouvement idéal serait une trajectoire en forme de huit. La plupart du temps, on se contente d'un déplacement vertical qui convient d'ailleurs très bien aux pièces longues (mouvement dans la direction de l'axe de symétrie).

On utilise également la trempe aux jets qui a pour avantage de supprimer toute formation de vapeur adhérant à la pièce.

Les jets doivent être bien réglés de façon à éviter les importantes déformations qui se produiraient inévitablement dans le cas contraire.

Lorsque des poches de vapeur se forment autour des pièces, des zones de moindre dureté se produisent, car le refroidissement est plus lent en ces endroits, la vapeur étant mauvaise conductrice de la chaleur.

F. — Les fluides de trempe

Les fluides de trempe ont pour but de provoquer le refroidissement rapide des pièces en emportant les calories qu'elles ont emmagasinées au cours de la chauffe.

Les principaux fluides de trempe sont :

1° **Gazeux** : l'air soufflé.

2° **Liquides** :

a) l'eau et les solutions salines ;

b) les huiles minérales et animales et les graisses en fusion ;

c) les métaux et les sels en fusion.

Étude des principaux bains de trempe.

a) *Généralités.*

Un bain de trempe est caractérisé par la vitesse de refroidissement qu'il peut donner.

Pour comparer les vitesses de trempe des différents fluides, on a eu l'idée de mesurer les duretés d'un même métal trempé dans les différents bains. La dureté obtenue par la trempe dans de l'eau à 21° étant prise comme point de comparaison, on enregistre les résultats suivants sur un cylindre d'acier dur à 0,95 % de C, diamètre 12 mm, chauffé à 720°.

Il est à remarquer qu'il n'existe pas de bains à vitesse de trempe moyenne.

Bains de trempe		Rapport des vitesses de trempe de chaque bain avec celle de l'eau a 21°
Liquides à grande vitesse de trempe	Eau à 21°	1
	Eau à 38°	0,67
	Eau à 40°	0,46
	Eau + 5 % de soude à 21°	1,19
	Eau + 5 % de NaCl à 21°	1,16
	Eau + 20 % de NaCl à 21°	1
Liquides à faible vitesse de trempe	Huiles minérales	0,21 à 0,44
	Huiles végétales	0,15 à 0,36

b) *Les bains du premier groupe.*

Ils sont utilisés pour la trempe des aciers qui ont une forte vitesse critique de trempe, comme les aciers au carbone et les aciers au chrome.

Les pièces massives exécutées avec ces aciers ne prendront pas la trempe à cœur.

a) **Eau.**

L'eau est un liquide très employé, surtout en raison de son faible prix de revient. Sa vitesse de trempe varie beaucoup avec la température d'emploi.

L'eau chaude donne une grande quantité de vapeur ; son usage entraîne donc une dureté insuffisante ou des points mous.

L'eau froide provoque une fin de refroidissement trop rapide, cause de tapures.

La température couramment choisie est de 30° avec une tolérance de ± 3°.

b) **Solutions de soude ou de chlorure de sodium.**

Elles fournissent une trempe plus énergique que l'eau, car leur point d'ébullition est plus élevé et la formation de la couche de vapeur moins importante.

Leur vitesse de trempe varie peu avec la température du bain. Elles pourront être utilisées dans de plus larges limites de température (de 25 à 50°).

Il n'est pas intéressant d'augmenter la teneur en sel marin au-delà de 5 %, la vitesse de trempe ne s'en trouvant pas améliorée. Il est bon de noter que les solutions de soude décapent les pièces qui ont été chauffées ou cémentées au bain de sel. Malheureusement leurs projections sont dangereuses.

c) *Les bains du deuxième groupe.*

Ils sont utilisés pour la trempe d'aciers spéciaux (à base de nickel, manganèse, tungstène, vanadium, molybdène) qui ont une faible vitesse de trempe.

a) Huiles et graisses d'origine végétale ou animale.

Les principales huiles utilisées sont l'*huile de colza et l'huile de lin*. Elles ont un point d'inflammabilité élevé, de 350 à 400°. Neuves, elles donnent de bons résultats mais elles sont instables, s'oxydent à l'usage et perdent de leur pouvoir trempant. Elles déposent alors sur les parois des bacs et des tuyauteries. L'huile s'épaissit et doit être fréquemment renouvelée. Aussi leur emploi est-il de plus en plus abandonné.

Le *suif* ou *graisse de bœuf* est quelquefois utilisé pour la trempe soit à l'état fondu, soit à l'état naturel. Il donne une vitesse de trempe inférieure à celle des huiles. Son emploi est de moins en moins fréquent.

b) Huiles minérales.

Elles ont un point d'inflammabilité relativement bas (de 170 à 230°), mais leur inflammation n'a qu'un effet purement local : si la température de l'huile est basse (moins de 100°), la flamme ne se propage pas.

Fait plus grave, les huiles minérales s'altèrent à l'usage par des phénomènes de distillation et de cracking. Il y a décomposition de l'huile sous l'action de la chaleur et les propriétés du bain peuvent se modifier très sérieusement.

Cependant, des recherches récentes ont amené les fabricants à trouver des huiles possédant une grande stabilité, surtout lorsqu'elles sont utilisées à température constante sous de gros volumes.

Les huiles minérales sont, à l'heure actuelle, les seules huiles pratiquement employées.

Le pétrole est également utilisé, car il fournit une vitesse de trempe légèrement supérieure à celle des huiles. Son emploi est cependant assez restreint : il s'enflamme et s'évapore plus facilement que les huiles.

c) Bains de sels ou de métaux en fusion.

Les bains de sels fondus (sels neutres à base de chlorures alcalins), les bains de plomb ou zinc en fusion portés à 450° ou 500° constituent des fluides de trempe pour le traitement des aciers rapides dont la température de transformation est élevée (650°) et la vitesse de trempe faible.

d) Air soufflé.

L'air soufflé peut être également utilisé pour la trempe des aciers à faible vitesse de trempe et notamment pour les aciers rapides et les aciers autotrempants. Il est recommandé de ne pas dépasser 0,200 à 0,300 kg par cm^2, pour la pression effective du jet d'air, et d'envoyer l'air ainsi détendu dans une caisse en tôle par des tuyères aplaties, de manière à refroidir aussi régulièrement que possible toute la masse à tremper.

G. — Les installations de trempe

1° Trempe par immersion.

Les installations de trempe comportent, à proximité des fours, des bacs remplis du liquide de trempe et desservis par des appareils de manutention : grue à col de cygne, monorail avec palan, etc.

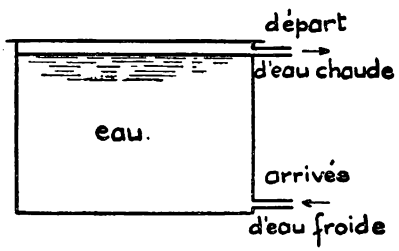


Fig. 20. — Bain de trempe à renouvellement de liquide.

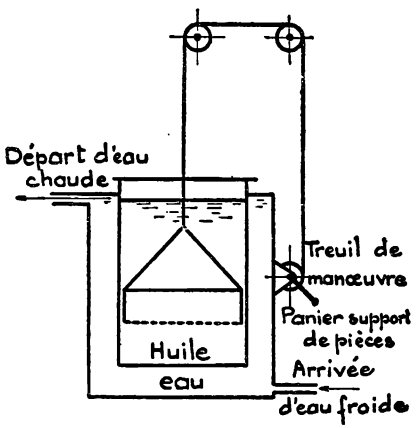


Fig. 21. — Bain de trempe à refroidissement par circulation d'eau dans une double paroi.

Un bac de trempe doit être conçu de façon à assurer le maintien à température constante du liquide, surtout s'il s'agit d'un traitement thermique exécuté en série.

Ce résultat s'obtient :

1° En donnant au bac la plus grande capacité possible : il existe des bacs, pour trempe continue de moyennes pièces, qui contiennent 20 000 l d'huile et qui n'ont pas été vidangés depuis plus de 10 ans.

2° En prévoyant un système de réfrigération : renouvellement du liquide, s'il s'agit de l'eau (*fig.* 20).

Si le liquide de trempe coûte cher, on le refroidit en faisant évacuer, par l'eau, les calories fournies par les pièces.

D'où les différentes solutions :

a) *Refroidissement par circulation d'eau.*

a) L'eau circule dans une double paroi (*fig.* 21). Cette solution ne peut être utilisée que pour les petits bacs d'outillage. L'échange de température ne se fait que par la surface extérieure du bain et le refroidissement n'est pas énergique.

b) Pour augmenter la surface d'échange de chaleur, la circulation de l'eau se fait dans un serpentin plongé dans le liquide de trempe (*fig.* 22).

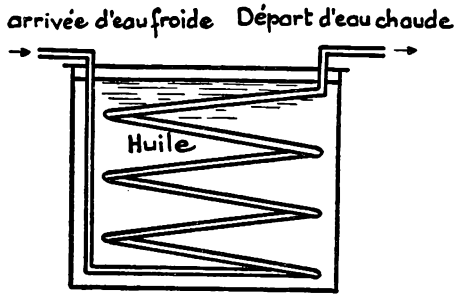


Fig. 22. — Bain de trempe refroidi par circulation d'eau dans un serpentin.

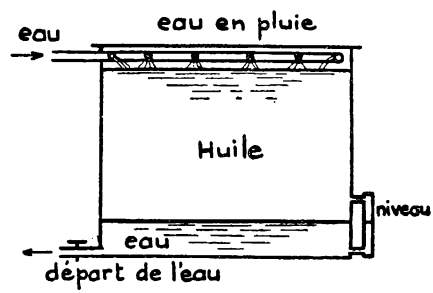


Fig. 23. — Bain de trempe à l'huile refroidi par de l'eau tombant en pluie et traversant le liquide de trempe.

c) Enfin, pour obtenir un meilleur rendement du refroidissement, l'eau tombe en pluie sur l'huile (*fig.* 23). En raison de sa plus forte densité, elle traverse la couche d'huile et s'accumule à la partie inférieure où elle peut être évacuée par l'intermédiaire d'un clapet automatique à flotteur lesté. L'échange des calories se fait donc par contact direct entre les deux liquides. Malheureusement, si l'on veut obtenir un traitement thermique homogène, le refroidissement ne peut se faire pendant l'opération de trempe.

b) *Refroidissement par circulation d'huile.*

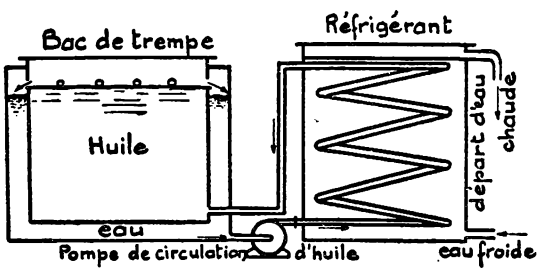


Fig. 24. — Bac de trempe refroidi par circulation d'huile.

L'huile chaude, prise à la partie supérieure du bac de trempe, est envoyée par l'intermédiaire d'une pompe dans le serpentin d'un réfrigérant à eau. L'huile froide est refoulée à la partie basse du bac, de telle sorte qu'il s'établit autour des pièces un mouvement d'huile qui active le refroidissement (*fig.* 24).

c) *Mouvement des pièces dans les bacs.*

C'est généralement un mouvement vertical. Les pièces sont disposées sur un panier métallique perforé, soutenu par des chaînes ou un câble. Le mouvement ascendant et descendant est donné manuellement au moyen d'un treuil pour les petites installations (*fig.* 21), ou d'un palan électrique pour les installations plus importantes.

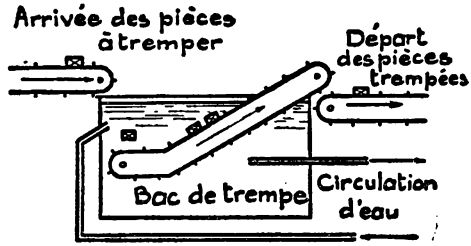


Fig. 25. — Installation de trempe avec manutention automatique des pièces.

Lorsqu'on fait de la trempe en série, la manutention des pièces est entièrement automatique. Elle est obtenue par transporteurs (*voir fig.* 25).

Le refroidissement s'effectue dans un bac à circulation d'huile.

2° Trempe au jet.

Elle est utilisée lorsque la trempe ne doit intéresser qu'une partie de la pièce comme c'est le cas pour ce gros marteau où seules les tables doivent être durcies. Le liquide de trempe est envoyé sous forme de pluie (*voir fig.* 26).

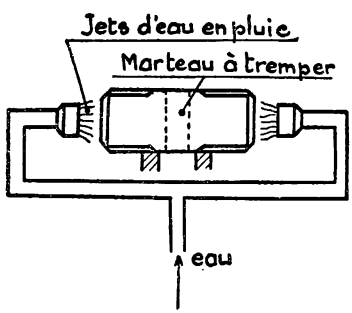


Fig. 26. — Trempe au jet.

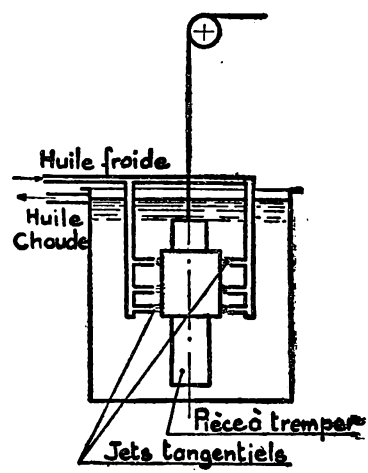


Fig. 27. — Trempe combinée par immersion et au jet.

Pour les grosses pièces, on combine souvent la trempe au jet et la trempe par immersion. Les jets activent la circulation du liquide aux environs immédiats de la partie à tremper (*voir fig.* 27).

H. — Trempe superficielle

Certaines pièces (engrenages, arbres de machines) doivent présenter une dureté superficielle importante et une grande résilience à cœur. Elles sont exécutées en acier spécial, à forte teneur de carbone, primitivement traité (trempe suivie d'un revenu à haute température).

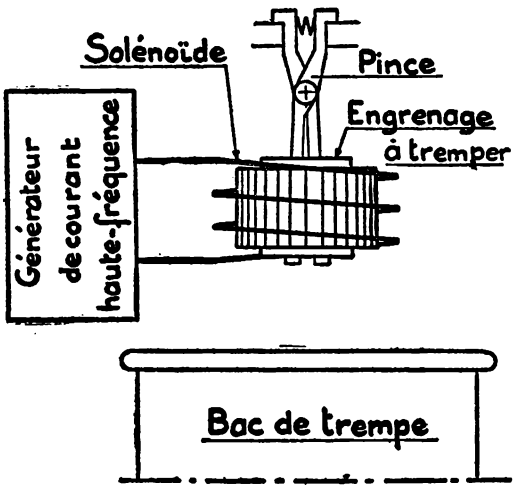


Fig. 27 bis. — Trempe superficielle.

Avant rectification, les pièces usinées à l'outil sont chauffées superficiellement et trempées.

Pour réaliser cette opération, on place les pièces à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant alternatif à haute fréquence (50 000 périodes par seconde), produit par un générateur spécial.

L'ensemble solénoïde-pièce se comporte comme un transformateur. Des courants induits de haute fréquence prennent naissance dans la pièce et se localisent à la périphérie (effet pelliculaire). L'échauffement du métal se produit sur une profondeur de 1 à 2 mm seulement. Une pince, commandée automatiquement par thermostat, libère en temps voulu la pièce qui tombe dans le bain de trempe (*voir fig. 27 bis*).

Ce procédé de trempe nécessite l'emploi d'une machine spéciale. Il tend à se substituer de plus en plus à la cémentation.

LE REVENU

A. — But du revenu

Le revenu est un traitement thermique qui ne s'applique qu'aux métaux préalablement trempés. Il consiste en un chauffage du métal trempé à une température inférieure à A_{c1}.

Le revenu a pour but de diminuer les effets de la trempe. Il supprime les tensions internes, en partie responsables de la fragilité de l'acier trempé, en diminuant très peu la dureté.

La martensite, solution solide de carbone dans le fer α, est transformée en un constituant nouveau : la *sorbite*, agrégat de fer α et de carbure de fer, analogue à la troostite. La sorbite est constituée par des lamelles très minces de carbure de fer, disposées entre des couches très peu épaisses de fer. Elle est presque aussi dure que la martensite, mais beaucoup moins fragile.

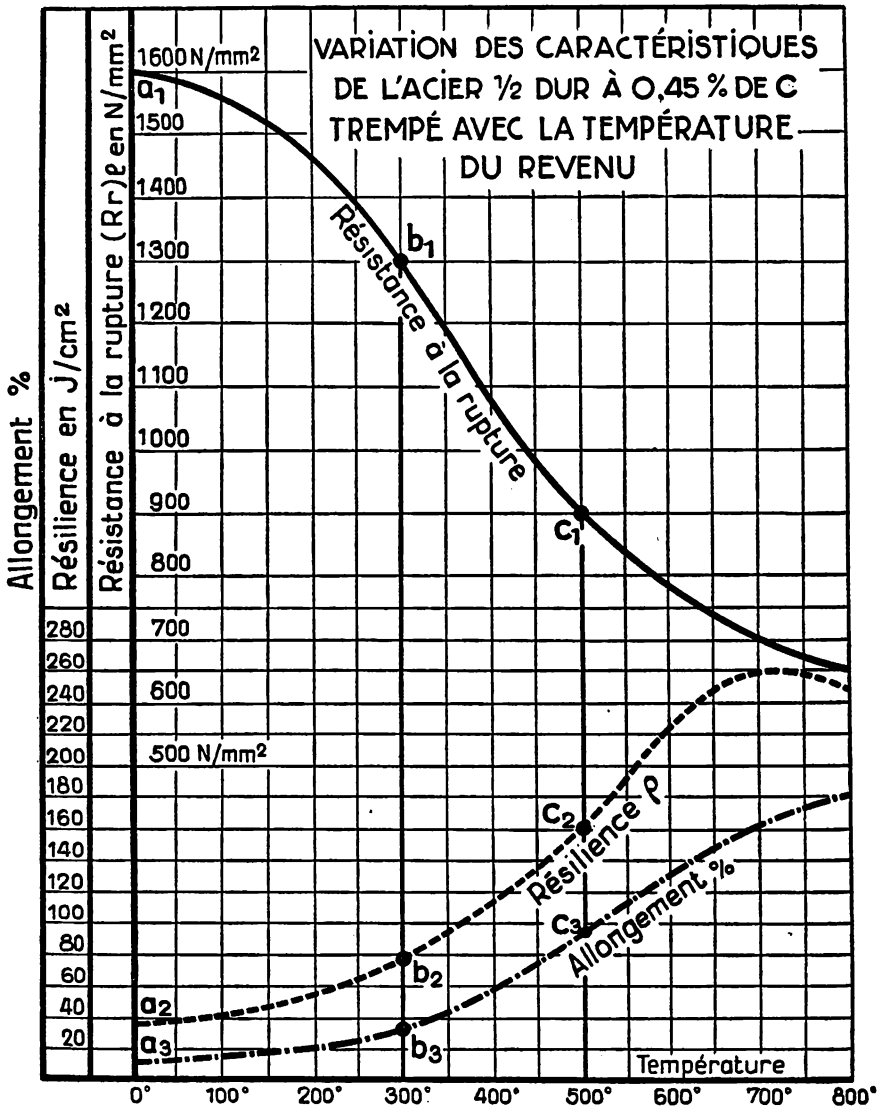


Fig. 28. — Graphique donnant les variations des caractéristiques d'un acier, en fonction de la température du revenu.

B. — Mode opératoire

Le revenu comprend :

a) **Un chauffage à une température déterminée**, pour chaque métal, par les caractéristiques mécaniques à obtenir, mais toujours inférieure au point de transformation A_{c1}.
La température de revenu doit être atteinte avec une approximation de $\pm$ 5° si l'on désire des résultats comparables.

b) **Le maintien en température** pendant le temps nécessaire pour que l'échauffement soit uniforme dans toute la pièce.

c) **Un refroidissement** assez lent, obtenu en général à l'air. On évite ainsi la création de légères tensions pouvant résulter d'une brusque chute de température.

C. — Modification des caractéristiques

Les essais ont montré que les caractéristiques des aciers trempés soumis à un revenu sont généralement modifiées comme suit :

a) **La résistance à la rupture diminue.**
b) **La dureté diminue.**
c) **La résilience augmente.**
d) **L'allongement % augmente.**

L'importance des modifications des caractéristiques est fonction de la température.

Plus le revenu est fait à haute température, plus les effets de la trempe sont atténués.

La *figure* 28 est la traduction graphique des variations des caractéristiques mécaniques d'un acier au carbone demi-dur trempé, en fonction des températures du revenu.

On peut y relever les valeurs des caractéristiques correspondant aux différents états : trempé (points *a*), trempé et revenu à 300° (points *b*), trempé et revenu à 500° (points *c*) et recuit correspondant à un revenu à 800° ; elles sont consignées sur le tableau suivant :

État du métal	$(R_r)_e$	A %	K
Recuit	650 N/mm^2	18 %	240 J/cm^2
Trempé à l'eau.....	1 600 N/mm^2	1 %	30 J/cm^2
Trempé et revenu à 300°	1 300 N/mm^2	3 %	80 J/cm^2
Trempé et revenu à 500°	900 N/mm^2	9 %	160 J/cm^2

Il est à remarquer qu'un revenu effectué à haute température (500°) procure, par rapport à l'état recuit, une notable amélioration de la résistance à la rupture, tout en conservant au métal une bonne résilience et un pourcentage d'allongement assez important.

Les revenus effectués au-dessus de 300° sont appelés *revenus de détente.*

La dureté des aciers a varié à peu près proportionnellement aux résistances. Les aciers qui ont subi ainsi une trempe et un revenu à haute température sont dits « traités ». Ils sont de plus en plus utilisés en construction mécanique. L'amélioration des caractéristiques est beaucoup plus nette lorsqu'il s'agit d'aciers spéciaux. Par exemple, un acier au nickel-chrome (composition approximative : 0,3 % de C ; 4 % de Ni ; 1 % de Cr) présente les caractéristiques suivantes :

État recuit.

$$(R_r)_e = 850\ N/mm^2 \qquad A\ \% = 20 \qquad K = 130\ J/cm^2.$$

Trempé à l'huile et revenu à 550°.

$$(R_r)_e = 1\,200\ N/mm^2 \qquad A\ \% = 13 \qquad K = 130\ J/cm^2.$$

On comprend aisément l'intérêt que présentent ces traitements thermiques en construction mécanique. Ils sont appliqués sur les pièces ébauchées ou sur les pièces terminées à l'outil, avant les opérations de rectification.

D. — Pratique du revenu

Le revenu s'applique :

a) **Aux métaux** (aciers, duralumin) dont on veut améliorer les propriétés mécaniques par trempe et revenu. Pour les aciers, la température du revenu est supérieure à 450° et inférieure au point de transformation.

b) **Aux aciers d'outillage** trempés dont on veut diminuer la fragilité.

La température du revenu varie généralement entre 200 et 325°.

Comme dans tous les traitements thermiques, il faut chauffer le métal, contrôler la température et le refroidir.

1° Chauffe du métal et contrôle de la température.

Dans l'industrie, on utilise les fours à bain de sel qui permettent un chauffage uniforme et assurent en même temps le décapage de la pièce.

Quelquefois, on utilise des fours à atmosphère gazeuse. Il est intéressant d'employer alors un moufle pour éviter le contact direct des gaz de combustion avec la pièce et obtenir un chauffage aussi uniforme que possible. Quand le revenu

s'applique aux aciers et doit se faire au-dessus de 325°, température qui correspond à la zone de fragilité du métal, il y a lieu, pour éviter les tapures, de faire dégourdir les pièces en les plaçant quelques instants devant la porte du four.

Le contrôle de la température se fait au moyen d'une canne pyrométrique ou d'un pyromètre à dilatation. La durée de l'opération doit être comptée à partir du moment où la pièce aura été portée à la température du revenu. Le temps de mise en température est fonction du volume des pièces.

Pour les outils, où seule une partie doit être trempée et revenue, on peut réchauffer le métal en utilisant la chaleur rayonnée par le feu de forge ou une pièce massive préalablement portée au rouge. Mais on doit éviter le contact de l'outil avec le charbon en ignition ou avec la pièce chauffée, ce qui produirait un chauffage irrégulier.

Lorsqu'on désire faire revenir la pointe d'un outil qui vient d'être trempé, on utilise la chaleur emmagasinée dans la partie de cet outil qui n'a pas été immergée dans le liquide de trempe (application à la trempe d'un burin).

Dans ces deux cas, le contrôle de la température se fait par l'examen des couleurs de revenu. Cette méthode empirique, qui est fonction de l'épaisseur de la couche d'oxyde, de l'éclairement de l'atelier, et de l'œil de l'opérateur ne peut donner de résultats précis et constants.

A l'heure actuelle, dans les ateliers d'outillage, les outils sont groupés et peuvent être trempés :

a) **Individuellement** : l'extrémité chauffée est immergée dans le liquide de trempe ; on attend que la température du corps soit inférieure au point de transformation avant de refroidir tout l'outil par immersion totale dans le bain.

b) **En bloc** : tous les outils sont placés dans le four puis immergés entièrement dans le liquide. Dans ce cas, la trempe intéresse tout l'outil (barreau traité).

Quel que soit le mode de trempe, le revenu constitue une opération bien indépendante de la trempe ; les outils sont chauffés entièrement dans un four à bain de sel.

2° Refroidissement.

La vitesse du refroidissement n'a pas d'influence sur les résultats du revenu.

Cependant un refroidissement trop rapide, correspondant à la zone de fragilité du métal, risque de provoquer des tapures.

Aussi, pour des aciers au carbone revenus au-dessous de 300°, le refroidissement peut-il se faire par immersion dans l'eau.

Pour des températures supérieures et pour des pièces volumineuses, il a lieu dans l'huile chauffée à 150 ou 200° et se termine à l'air libre.

Si l'on ne dispose pas d'un bain d'huile chaude, un refroidissement à l'air libre donne généralement des résultats satisfaisants.

Pour certains aciers alliés au Ni-Cr, on constate une notable diminution de résilience quand le séjour à température élevée (650°) a été un peu long et lorsque le refroidissement a été trop lent. Dans ce cas, opérer un refroidissement rapide par immersion dans l'huile.

Le graphique (*fig.* 29) représente les opérations de trempe et revenu pour les aciers au carbone ; il est identique pour la majorité des aciers alliés.

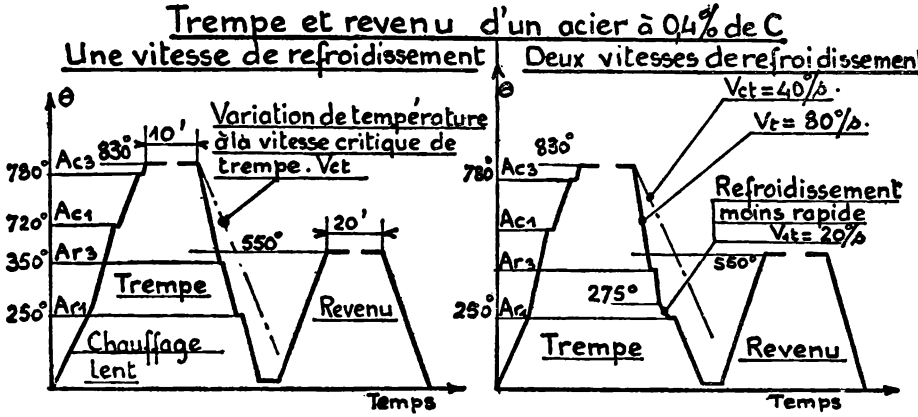


Fig. 29. — Graphique des variations de température en fonction du temps, pour les opérations de trempe et de revenu des aciers à 0,4 % de carbone.

E. — Importance du revenu dans le traitement des aciers rapides

Le revenu des aciers rapides est trop souvent oublié. Cependant, il atténue non seulement les tensions de trempe mais encore — fait curieux en contradiction avec les phénomènes constatés pour les autres aciers — il augmente la dureté et la résistance à la rupture, donnant ainsi aux outils leur tenue de coupe maximum. Les résistances à la rupture enregistrées pour un acier rapide sont par exemple :

État recuit : 850 N/mm².
Trempé et revenu à l'huile : 2 300 N/mm².
Revenu à 575° : 2 400 N/mm².

Mode opératoire.

Plonger les outils, préalablement trempés, dans un bain de sel ou de plomb chauffé à une température variant de 500 à 600° suivant les nuances. Par précaution, il est bon de faire un préchauffage des outils à 300°.

La durée du maintien en température, qui est d'environ 30 minutes, peut être portée à 2 heures pour des outils de forme délicate.

Pour les aciers rapides à haute teneur de cobalt, deux revenus successifs, à même température pendant 20 ou 30 minutes, sont recommandés. Le refroidissement se fait à l'air libre pour toutes les nuances.

F. — Trempe en condition isotherme

Un acier porté à une température A_{c3} + 50° est constitué d'austénite s'il s'agit d'acier au carbone. Dans le cas où l'on se trouve en présence d'aciers alliés, l'austénite a dissous les carbures des métaux incorporés.

Si l'on refroidit rapidement, il y aura transformation de fer α en fer γ, expulsion des carbures de A_{r3} à A_{r1}. La martensite n'apparaîtra qu'à la température A_{r1}. Si l'on refroidit rapidement, à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe, si l'on arrête le refroidissement à une température légèrement supérieure à A_{r1} et si l'on maintient le métal plusieurs heures à cette température, il se forme un constituant nouveau appelé *bainite*, dont les caractéristiques sont comparables à celles de la martensite.

Ce traitement porte le nom de *trempe isotherme.*

Un revenu à haute température et de grande durée assure une stabilité à la bainite et améliore les propriétés du métal ; il est souvent appliqué.

La trempe isotherme ne donne pas d'excellents résultats avec tous les aciers. Mais elle est recommandée pour :

— les aciers de construction demi-durs au carbone ;

— les aciers de cémentation utilisés pour les petites pièces ;

— certains aciers à ressorts mangano-siliceux ;

— certains aciers spéciaux de construction au nickel-chrome, et certains aciers d'outillage.

La comparaison des caractéristiques mécaniques de ces aciers, après trempe isotherme, avec celles de ces mêmes aciers ayant subi une trempe ordinaire martensitique suivie d'un revenu, donne les résultats suivants :

dureté comparable, résilience, résistance à la rupture et malléabilité légèrement supérieures,

en faveur du traitement isotherme.

La trempe isotherme a surtout pour avantage d'éviter les tapures et microtapures qui risquent de se produire au moment de la formation martensitique.

Mode opératoire.

Les pièces doivent être chauffées, avec précision, aux températures conseillées par les métallurgistes : 800° environ pour les aciers de construction au carbone et 875° pour certains aciers alliés.

Le chauffage au bain de sel est recommandé. On trempe ensuite la pièce dans un bain de sel chauffé à la température prévue pour le refroidissement (350 à 180° environ). On maintient les pièces à cette température durant plusieurs heures (3 à 4 heures).

Si l'on désire faire le revenu, celui-ci s'opérera également dans un bain de sel.

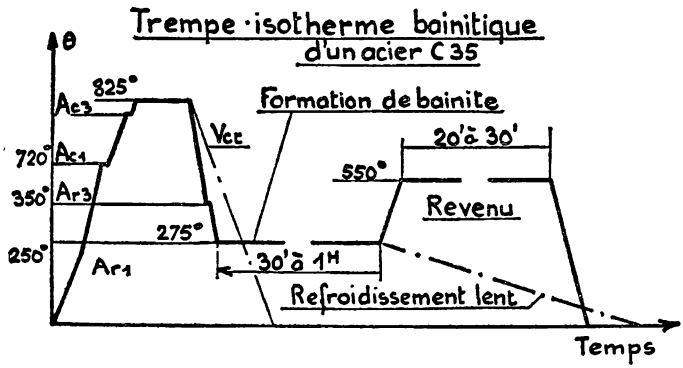


Fig. 29 *bis.* — Graphique des températures de trempe bainitique, en fonction du temps.

Le graphique (*fig.* 29 *bis*) représente la suite des opérations constituant la trempe isotherme.

LE RECUIT

A. — But du recuit

Le recuit est un traitement thermique qui consiste en un chauffage des pièces à une température supérieure au point de transformation, suivi d'un refroidissement lent, de vitesse inférieure à la vitesse critique de trempe.

Il a pour but de :

a) **supprimer les effets de la trempe** : *recuit d'adoucissement* ;

b) **régénérer le métal surchauffé,** en lui donnant une texture à grains fins caractérisant une amélioration des propriétés mécaniques : *recuit de régénération* ;

c) **supprimer l'écrouissage** résultant d'un travail mécanique à froid, ou **les tensions internes** provoquées par un forgeage inégalement réparti dans les différentes parties de la pièce et exécuté à trop basse température : *recuit de normalisation.*

B. — Modification des caractéristiques

Les caractéristiques des métaux varient dans le même sens pour le recuit et pour le revenu.

a) **La résistance à la rupture** diminue.

b) **La dureté** diminue.

c) **La résilience** augmente.

d) **Le pourcentage d'allongement** augmente.

Le métal devient donc plus malléable et résiste mieux aux efforts brusques ou alternés et aux chocs.

Considérons un acier demi-dur à 0,4 % de carbone. Il présente, suivant son état, les caractéristiques données par le tableau suivant :

État du métal	$(R_r)_e$	A %	K
Naturel (brut de laminage).....	570 N/mm^2	20 %	220 J/cm^2
Étiré (fortement écroui).....	650 N/mm^2	10 %	100 J/cm^2
Trempé à l'eau.....	1 500 N/mm^2	2 %	40 J/cm^2
Recuit.....	500 N/mm^2	26 %	280 J/cm^2

On peut constater l'influence du recuit sur des produits laminés (légèrement écrouis), étirés (fortement écrouis) et trempés.

Il est à remarquer que l'écrouissage peut être comparé à une « trempe mécanique » du métal, dont les cristaux ont été déformés par un travail mécanique exécuté à froid ou à trop basse température.

C. — Mode opératoire

Comme tous les traitements thermiques, un recuit comporte un chauffage, un maintien en température et un refroidissement.

1° Chauffage.

La température du recuit doit être supérieure au point de transformation. Pour les recuits d'adoucissement et de régénération, on dépasse de 50° environ la température de transformation A_{c3}. Pour le recuit de normalisation, on

chauffe un peu plus (à A_{c3} + 200°) afin que le métal, devenu plus malléable, puisse se détendre et que l'équilibre moléculaire soit obtenu.

Il ne faut pas dépasser cette température, car on risquerait de provoquer la surchauffe du métal, caractérisée par une cristallisation grossière qui entraîne une fragilité excessive et une diminution de la résistance.

Le chauffage s'effectue dans des fours comme pour la trempe. Il y aura lieu de prendre toutes les précautions permettant d'éviter l'oxydation, la décarburation, la déformation des pièces et les tapures.

2° Maintien en température.

Il sera le plus court possible pour éviter l'oxydation et la surchauffe, mais assez long cependant pour que les transformations internes aient le temps de se produire. Pratiquement, cinq à dix minutes suffisent. Il est bien évident que ce temps doit être compté à partir du moment où toute la masse métallique a atteint la température du recuit.

3° Refroidissement.

Nous avons vu que la vitesse de refroidissement doit être inférieure à celle de la trempe. Généralement, le refroidissement est lent et, suivant le métal à recuire, il peut être obtenu :

1° **En sortant les pièces du four,** l'évacuation des calories se faisant au contact de l'air ;

2° **En plaçant les pièces sorties du four dans un calorifuge** (sable, chaux vive ou fraisil) ;

3° **En laissant les pièces dans le four,** le chauffage étant arrêté et les **portes ouvertes ;**

4° Après avoir mis bas les feux, **en laissant les pièces dans le four** dont **les portes et le registre d'évacuation des gaz** sont **fermés.**

Lorsqu'on désire un refroidissement encore plus lent, **les pièces sont chauffées dans une caisse remplie de sable** et laissées dans le four après arrêt du chauffage, les portes et le registre des gaz étant fermés.

Le refroidissement doit être très lent au moment où la température est voisine du point de transformation. Aussi, dans certains cas, surtout lorsque la température de chauffe est élevée (A_{c3} + 200°, comme c'est le cas pour le recuit de normalisation), on peut, pour éviter une cristallisation grossière, provoquer un refroidissement plus rapide, jusqu'au point de transformation A_{r1}, en arrêtant le chauffage et en ouvrant les portes du four, puis un refroidissement lent en les refermant.

A noter que, vers la fin du refroidissement, la chute de température peut être plus rapide.

D. — Principaux recuits

1° Aciers au carbone.

a) *Aciers doux.*

Le chauffage doit se faire, pour la suppression des effets de la trempe et de la surchauffe, à une température de 900° (A_{c3} + 50) et, pour la suppression de l'écrouissage, à 950° ou 1 000°.

Le maintien en température peut être de 10 minutes, le refroidissement ayant lieu à l'air libre. On remplace souvent le recuit par une trempe qui permet d'obtenir une meilleure résilience.

b) *Aciers demi-durs.*

Chauffe à 800° (750 + 50°) pour les recuits d'adoucissement et de résignation, et à 900° pour le recuit de normalisation. Le refroidissement s'opère dans le four, les portes restant ouvertes.

c) *Aciers durs.*

Chauffe à 775° ou 875°, suivant le cas. Maintien en température le plus court possible (5 minutes), car cet acier est sensible à la surchauffe. Refroidissement rapide jusqu'à 650°, obtenu en ouvrant les portes du four afin d'éviter un séjour trop long à une température supérieure au point de transformation. Ensuite, la chute de température, plus lente, nécessite la fermeture des portes du four.

d) *Aciers extra-durs.*

Chauffe à 750° ou 850° pendant 5 minutes à peine. Le refroidissement, rapide jusqu'à 600° par ouverture du four, est ensuite rendu plus lent par obturation des portes et du registre. Un four calorifugé convient très bien. Le refroidissement peut durer quelques heures.

2° Aciers spéciaux.

Il y a lieu de se reporter aux indications des métallurgistes, données sur les catalogues ou notices techniques.

Il est bon de connaître cependant quelques généralités.

a) *Aciers au nickel.*

Le recuit est souvent remplacé par un revenu à haute température (surtout pour la suppression de l'écrouissage). Chauffe à 650° pendant plusieurs heures. puis refroidissement à l'air ou à l'huile.
On utilise rarement le recuit à une température de 900° ou 950°, car il demande un temps et un refroidissement très longs.

b) *Aciers au chrome.*

Chauffe à 720° ou 750° pendant un temps pouvant atteindre 30 minutes. Refroidissement très lent.

Pour les aciers à moyenne teneur dits auto-trempants (de 10 à 20 %), le recuit supprime l'écrouissage mais ne modifie pas beaucoup la dureté et le pourcentage d'allongement.

c) *Aciers au nickel-chrome.*

Le recuit est remplacé souvent par un revenu à haute température, comme pour les aciers au nickel. Pour certains aciers au nickel-chrome, contenant en outre un autre constituant comme le molybdène, on procède successivement à un recuit à 825° avec refroidissement à l'air, et à un revenu à 650° avec refroidissement très lent dans le four.

d) *Aciers au vanadium pour ressorts.*

Chauffe à 720° pendant une heure environ, puis refroidissement très lent dans le four.

e) *Aciers mangano-siliceux pour ressorts.*

Chauffage à 700° pendant 5 à 10 minutes, refroidissement lent dans le four.

f) *Aciers rapides.*

Chauffage de 750° à 850° pendant 1 à 2 heures dans une caisse de sable pour éviter l'oxydation. Ce temps doit être compté à partir du moment où les pièces sont en température, ce qui nécessite souvent plusieurs heures de chauffe.

Le refroidissement, très lent dans le four, toutes portes fermées, peut durer 12 à 15 heures.

3° Métaux non ferreux.

a) *Cuivre.*

Chauffage à 650° (rouge sombre) et refroidissement dans l'eau froide.

b) ***Laiton.***

Chauffage de 500° à 550° (rouge sombre naissant) et refroidissement à l'air.

c) ***Aluminium.***

Chauffage à 400°, puis refroidissement dans l'eau froide.

d) ***Duralumin.***

Chauffage de 375° à 400° avec refroidissement lent.

e) ***Alliages de magnésium.***

Chauffage à 300° pendant 2 à 4 heures et refroidissement lent.

E. — Pratique du recuit

Le recuit est principalement appliqué pour supprimer les effets de la trempe, mais surtout pour éliminer les tensions internes et les effets de l'écrouissage. Aussi le verrons-nous pratiqué :

1° Après finition des pièces.

a) **Pièces forgées** qui doivent présenter une résilience maximum.

b) **Pièces moulées** qui présentent des tensions internes résultant d'un refroidissement inégal, parce que trop rapide, dans des moules en coquilles ou en sable.

c) **Pièces laminées** qui ont subi un écrouissage intensif, surtout si l'opération mécaniqu a été conduite à trop basse température.
C'est ainsi, par exemple, que les tôles, surtout si elles sont minces, se recuisent après laminage. On les empile à cet effet dans des caisses, l'oxydation du métal étant de la sorte évitée. Les caisses, dont le couvercle est luté à l'argile, sont placées sur des wagonnets poussés dans un four tunnel. Lorsque la température du recuit est atteinte, et le métal resté suffisamment en température, on sort les caisses du four afin de provoquer une chute rapide de température. On replace, aussitôt après, les wagonnets dans le four, et on laisse refroidir lentement.

2° En cours de travail.

a) **Pièces usinées.** Le recuit est pratiqué avant les opérations de finition, pour supprimer les tensions internes résultant d'un dégrossissage à l'outil ou à la meule avec de fortes passes.

b) **Pièces chaudronnées ou embouties.** La chaudronnerie provoque, comme l'emboutissage, un écrouissage intense qui rend rapidement le métal si fragile que toute continuation du travail devient impossible.

Pour les pièces embouties, on procède, entre chaque passe, à des recuits dans des fours à atmosphère réductrice, où la température est contrôlée avec précision.

Par contre, les recuits opérés en cours de travail de chaudronnerie se font avec moins de précision. Le métal est chauffé localement au moyen d'un chalumeau oxyacétylénique, ou à gaz. On contrôle la température, d'une façon souvent approximative, par observation de la couleur du métal ou de l'action de la chaleur sur le bois tendre, la sciure de bois, le savon (*voir la leçon concernant la mesure des températures élevées*). Quelquefois cependant, pour le travail des métaux légers, on utilise un pyromètre à contact.

F. — Recuit en condition isotherme

Nous avons vu que le recuit nécessitait un chauffage au-dessus du point A_{c3}, suivi d'un refroidissement très lent. Ce refroidissement se fait, le plus souvent, dans le four. Il nécessite donc l'immobilisation d'un matériel coûteux pendant plusieurs heures.

Or, il a été prouvé expérimentalement qu'il existe, pour des températures inférieures à A_{c1} (vers 685° pour les aciers au carbone et 750° pour les aciers rapides supérieurs), une zone de transformation rapide de l'austénite.

Il suffit donc, pour recuire les pièces :

1° **De les porter à la température normale de recuit,** pendant le temps nécessaire à la dissolution des carbures dans l'austénite (10 minutes pour les aciers au carbone ; 1 à 2 heures pour les aciers rapides).

2° **De les immerger dans un bain de sel** porté à la température correspondant à la zone de transformation rapide (685° pour les aciers au carbone ; 750° pour les aciers rapides). Les pièces y sont maintenues pendant un temps relativement court (20 à 30 minutes pour les aciers au carbone ; 1 à 2 heures pour les aciers rapides).

3° **De les laisser refroidir rapidement** à l'air et même dans l'eau, à partir de 150°.

Le recuit en condition isotherme est employé pour normaliser les pièces forgées et, dans les ateliers d'outillage, pour le recuit des aciers rapides devant subir un usinage.

Il est intéressant de remarquer que la différence entre la trempe en condition isotherme et le recuit en condition isotherme provient de la température du bain de sel dans lequel le métal est plongé après chauffage.

LE VIEILLISSEMENT DES ACIERS ET DES FONTES

A. — Généralités

Dans l'étude des traitements thermiques, nous avons vu que des *tensions internes* prennent naissance à l'intérieur des pièces chauffées puis refroidies à des vitesses qui ne sont pas les mêmes pour toutes leurs parties. C'est le cas, non seulement des *pièces trempées*, mais aussi des *pièces coulées*, où la vitesse de refroidissement est plus grande à l'extérieur qu'à l'intérieur, et plus grande dans les parties minces que dans les parties massives.

On constate également l'existence de tensions internes, lorsqu'il s'agit de pièces qui ont subi un traitement mécanique : *forgeage* ou *usinage* à l'outil ou à la meule.

L'importance de ces tensions est évidemment fonction du mode de travail ; elles sont plus fortes si la section du copeau est grande (*ébauche*).

Ces contraintes internes ont pour effet de provoquer la *déformation lente* des pièces, déformation qui prend fin lorsqu'un équilibre moléculaire est obtenu.

Ce phénomène porte le nom de *vieillissement* du métal ; sa durée peut être très longue et atteindre même plusieurs années.

B. — Suppression des tensions internes : stabilisation du métal

Le *recuit* appliqué aux pièces a pour résultat de supprimer ces tensions. Mais il n'est pas toujours possible d'appliquer ce traitement thermique, notamment à des pièces massives moulées (bâtis de machines), ou sur des pièces qui ont subi un usinage de demi-finition, ou de finition. Les déformations ne présentent pas un grand inconvénient, s'il s'agit de pièces de mécanique ordinaire. Mais, lorsqu'on exécute des organes de machines appelés à subir un usinage soigné (*grattage, rectification, rodage*), la valeur des déformations peut être plus grande que les tolérances admises pour leur fabrication. C'est le cas des bâtis des tables de machines et des appareils de mesure.

On a constaté qu'un *revenu prolongé*, à une température inférieure à 200°, et dont la durée peut atteindre plusieurs centaines d'heures, accélère le vieillissement en permettant d'atteindre l'équilibre moléculaire garantissant par la suite l'indéformabilité des pièces.

Le fait de placer des pièces dans un endroit où la température varie permet de parvenir à un résultat analogue ; mais la durée de ce traitement est beaucoup plus longue.

C. — Applications

1° **Les bâtis des machines venant de fonderie** ne peuvent pas être utilisés immédiatement et sont généralement entassés dans des parcs à l'air libre ou dans des hangars ouverts, pendant cinq ou six mois ; cette pratique constitue un premier vieillissement. Ensuite, les bâtis sont rabotés et mis à vieillir, à nouveau pendant plusieurs mois, dans les mêmes conditions, avant d'être grattés.

Une machine-outil de qualité sera donc exécutée avec une fonte parfaitement stabilisée.

2° **Pour la fabrication des calibres à tolérance,** le vieillissement s'effectue dans des étuves maintenues à température constante. A titre d'indication, nous énumérons la suite des opérations nécessaires à la fabrication de ces calibres :

Estampage — Recuit de stabilisation — Dégrossissage à l'outil ou à la meule, trempe et revenu, stabilisation pendant 150 *heures à* 150° *— Rectification — Stabilisation pendant* 24 *heures à* 150° *— Rodage.*

Il est intéressant de noter la succession des traitements de stabilisation après chacune des opérations qui a risqué de provoquer des tensions internes.

LA CÉMENTATION

A. — Définition

Certaines pièces, utilisées en construction mécanique, doivent à la fois présenter une *grande résilience* et une *importante résistance à l'usure.* C'est le cas, par exemple, des essieux de véhicules, qui subissent des efforts brusques assimilables à des chocs et dont les tourillons doivent présenter une usure minimum.

La grande résilience est obtenue en choisissant, pour l'exécution des pièces, de l'acier à faible teneur en carbone (0,1 à 0,2 % : acier doux).

La résistance à l'usure nécessite une grande dureté des surfaces frottantes, c'est-à-dire de l'extérieur des pièces (dureté superficielle).

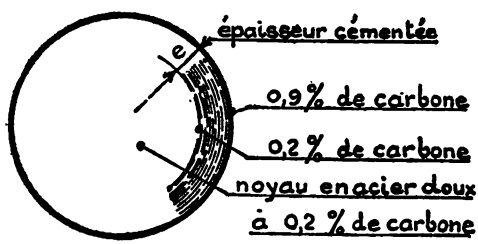


Fig. 30. — Coupe schématique d'une pièce cémentée.

Le durcissement d'un acier peut être obtenu par trempe, à condition que le métal traité contienne une forte teneur en carbone (0,9 % : acier dur).

Le métal utilisé pour l'exécution d'une pièce doit être à la fois résilient et superficiellement dur. Il doit être de composition *hétérogène* : l'intérieur, en acier

doux, assure la résilience désirée, l'extérieur, en acier dur, permet d'obtenir la dureté recherchée.

La pièce, exécutée en acier doux, est transformée superficiellement en acier dur par diffusion de carbone dans le métal ; la combinaison fer-carbone se produit : la pièce est cémentée.

La cémentation a donc pour but de faire absorber, superficiellement, du carbone par l'acier doux, de façon à constituer un alliage hétérogène ayant à la surface une teneur en carbone suffisante pour lui permettre d'acquérir, par la trempe, une très grande dureté.

B. — Principe

Les parties de la pièce que l'on désire cémenter sont entourées d'un corps riche en carbone, appelé *cément.*

Pour que le carbone puisse pénétrer dans le métal et s'allier avec le fer, la pièce doit être portée à une température comprise entre 900 et 950°, supérieure au point de transformation de l'acier doux. La teneur en carbone à la superficie et la profondeur de pénétration dépendent de la durée de l'opération et du cément utilisé.

C. — Principaux céments utilisés

Les céments utilisés peuvent être *solides, liquides* ou *gazeux.*

a) **Les céments solides.** Ils sont constitués par du charbon de bois mélangé avec des sels métalliques (carbonate de baryte, ferrocyanure de potassium ou de sodium, etc.). Le cément de Caron, qui a été très employé, contient simplement 60 % de charbon de bois et 40 % de carbonate de baryte. Il s'épuise assez rapidement.

Les céments actuels sont granulés et imprégnés de produits agglomérants dans toute la masse. Ainsi sont supprimées les poussières résultant de la manutention.

b) **Les céments liquides.** Ils sont constitués par des sels métalliques fondus à la température de cémentation : cyanure de sodium, carbonate de sodium, chlorure de sodium, etc. Ils peuvent, en outre, contenir à l'état liquide, extrêmement divisé, du carbone mis en suspension dans le bain.

c) **Les céments gazeux.** Ce sont des gaz riches en carbone : oxyde de carbone, gaz d'éclairage, acétylène, carbures d'hydrogène ou vapeurs de pétrole.

Un bon cément doit :

1° Avoir une composition parfaitement définie ;
2° Avoir un effet constant ;
3° Pouvoir être utilisé un grand nombre de fois.

D. — Aciers pour cémentation

Ce sont des aciers à *faible teneur en carbone* (0,1 à 0,2 %) contenant *peu de manganèse* (moins de 0,5 %) et *peu de silicium* (moins de 0,3 %), ces deux corps étant nuisibles à la cémentation. Le nickel retarde la diffusion du carbone tandis que le chrome l'accélère. Cependant on cémentera les aciers à faible teneur de nickel (2 à 6 %) ; les aciers au nickel-chrome sont également très utilisés. Ces aciers spéciaux sont préférés aux autres car, sous la couche cémentée et trempée, le métal est plus résistant et plus résilient que ne le serait l'acier doux au carbone.

Notons enfin que les aciers écrouis (étirés ou laminés) à froid se cémentent mal. Ces aciers devront donc être recuits au préalable. On veillera également à ce que les pièces ne présentent pas d'inclusions d'oxyde qui empêchent localement la cémentation.

E. — La cémentation solide

1° Mécanisme de la cémentation.

Nous avons vu que le cément utilisé contient essentiellement du charbon de bois et du carbonate de baryum et qu'il se présente sous la forme de grains de 7 à 8 mm de diamètre.

Les pièces à cémenter sont mises dans une caisse métallique contenant du cément qui les entoure complètement ; le tout est chauffé à 900 ou 950°.

Le charbon de bois porté au rouge donne de l'oxyde de carbone, avec l'oxygène de l'air logé entre les grains de cément.

Le carbonate de baryum, porté au rouge, se décompose sous l'action de la chaleur comme le fait la pierre à chaux, en donnant de l'oxyde de baryum et du gaz carbonique :

$$CO_3Ba = CO_2 + BaO.$$

Le gaz carbonique se trouve à son tour réduit par le charbon porté au rouge et transformé en oxyde de carbone.

L'oxyde de carbone pénètre dans le métal et, au contact du fer, produit le carbure de fer, constituant caractéristique des aciers :

$$2CO + 3Fe = Fe_3C + CO_2.$$

Le gaz carbonique, qui prend naissance en même temps que le carbure de fer, est à nouveau transformé en oxyde de carbone par le charbon :

$$CO_2 + C = 2CO.$$

Et la cémentation peut continuer. Elle se ralentirait d'elle-même si la circulation des gaz ne s'établissait pas facilement autour de la pièce et à travers le cément. D'où la supériorité des céments granulés sur ceux qui sont en poudre.

2° Vitesse de pénétration.

La diffusion du carbone dans le métal n'est pas instantanée. La cémentation est une opération assez longue.

L'épaisseur de métal, dont le pourcentage de carbone a augmenté, constitue la couche cémentée. Elle est en général de 1 mm.

La vitesse de pénétration, ou profondeur de pénétration du carbone par heure de chauffage, est fonction du cément employé et de la température.

Pour les aciers doux au carbone, la vitesse de pénétration est, à 900° avec du cément de Caron, de 1/10 de mm par heure jusqu'à 12/10 ; puis elle ralentit de manière à donner une couche cémentée de 2 mm en 24 heures.

Les *céments granulés*, actuellement employés, donnent, dans les mêmes conditions, une vitesse de pénétration à peu près constante de 0,20 mm à l'heure pendant les 10 premières heures : ainsi il faut 5 ou 6 heures pour obtenir une couche cémentée de 1 mm d'épaisseur.

Dans les deux cas, la teneur en carbone à la surface de la pièce atteint 0,9 % pour une épaisseur cémentée de 1 mm (cette proportion assure, après trempe, le minimum de fragilité). La température a une grande influence sur la vitesse de pénétration : plus elle est élevée, plus la cémentation est rapide. De 850 à 1 000°, la vitesse de diffusion du carbone peut être triplée. Lorsque l'action du cément est trop rapide, la teneur superficielle en carbone devient supérieure à 0,9 % et, après trempe, la couche cémentée, très fragile, risque de s'écailler au moindre choc. C'est pourquoi on adopte généralement 900° pour les aciers doux au carbone et 850° pour les aciers au nickel.

Les substances organiques (poudre d'os, cuir et corne calcinée) et le ferrocyanure, incorporés au cément, ont pour effet d'augmenter la vitesse de pénétration. On obtient ainsi des céments brusques ayant une vitesse de diffusion, au début, de 4/10 de mm en 1 heure. Mais leur action s'épuise vite et la couche cémentée est peu épaisse.

3° Mode opératoire.

Les pièces à cémenter, placées dans des boîtes métalliques, y sont disposées de façon à être entourées par une épaisseur de cément de 4 à 5 cm.

Les boîtes sont préparées en plaçant dans le fond un lit de cément de 5 cm ; ensuite on dispose les pièces, en laissant entre elles un intervalle convenable, et on les recouvre d'un nouveau lit de cément ; une nouvelle série de pièces est

placée et ainsi de suite pour terminer par une couche de cément. Un couvercle métallique luté à l'argile sert de fermeture étanche à la caisse (*voir fig.* 31). On évite ainsi toute entrée d'air qui aurait pour effet de s'opposer à la formation d'oxyde de carbone et de diminuer ainsi l'importance de la cémentation.

Les caisses sont disposées dans un four et portées à la température de cémentation. Pour que la chauffe soit uniforme, elles sont placées non pas directement sur la sole, mais sur des briques, afin que les gaz puissent lécher toutes les faces.

Le temps de chauffe comprend la mise en température et la cémentation proprement dite. La durée de la mise en température est fonction de la grosseur des boîtes et peut atteindre 5 ou 6 heures.

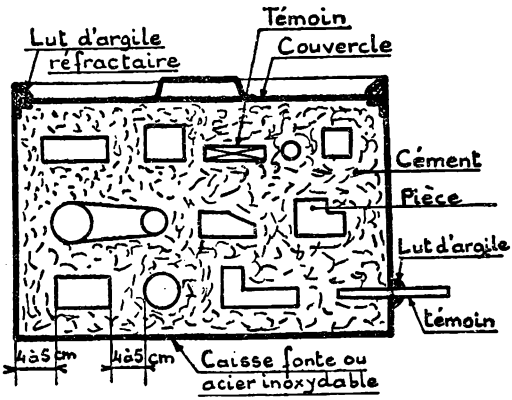


Fig. 31. — Constitution d'une caisse de cémentation.

La durée de la cémentation dépend du cément employé et de la teneur en carbone désirée sur la couche extérieure. Avec les céments actuellement employés, on compte de 5 à 6 heures pour obtenir une teneur en carbone égale à 0,9 %.

L'épaisseur de la couche cémentée est alors de 1 mm environ.

Le contrôle de la température se fait au moyen d'une canne pyrométrique qui doit plonger à l'intérieur de la caisse. Cependant, lorsqu'on connaît la durée de mise en température, on se contente de placer le pyromètre à l'intérieur du four seulement.

Pour contrôler la cémentation on dispose, à la partie supérieure de la boîte, des pièces témoins ou des éprouvettes sur lesquelles on pourra faire des essais.

Souvent, des éprouvettes cylindriques, dont une extrémité pénètre dans la boîte par un petit trou, permettent de contrôler la cémentation au cours de l'opération. Lorsqu'on les retire, il se produit une rentrée d'air ; c'est là un petit inconvénient.

a) *Conduite de la chauffe.*

Aucune précaution spéciale n'est à prendre, car la couche de cément qui entoure la pièce sert de calorifuge et modère la vitesse de mise en température du métal.

Cependant, pour éviter une trop rapide détérioration des caisses, il est conseillé de ne pas les placer directement dans un four trop chaud.

b) *Refroidissement.*

Généralement, on laisse les pièces se refroidir dans les caisses, qui peuvent indifféremment rester dans le four ou en être retirées.

L'extraction des pièces de leurs boîtes, lorsqu'elles sont encore à haute température, constitue une opération pénible. Elle provoque, par combustion, une perte importante de cément et ne permet pas d'obtenir un traitement thermique précis (*voir plus loin*).

c) *Boîtes de cémentation.*

Elles se font en tôle épaisse soudée à l'arc, ou en fonte, et affectent généralement une forme parallélépipédique.

Elles s'oxydent rapidement et se déforment beaucoup ; leur épaisseur diminue. Leur durée est, par suite, assez limitée et le prix de revient de la cémentation se trouve notablement majoré.

Aussi a-t-on cherché à augmenter la durée des boîtes en les fabriquant avec des métaux résistant à de hautes températures et en leur donnant une forme qui permet de limiter l'importance des déformations. Les métaux employés sont : les bronzes d'aluminium, les alliages nickel et chrome, les aciers inoxydables au nickel-chrome et au nickel-aluminium.

4° Traitements thermiques après cémentation.

Le métal cémenté, ayant été porté pendant plusieurs heures à une température supérieure au point de transformation A_{c3}, est surchauffé : son grain devenu grossier le rend fragile.

Les traitements thermiques qu'il doit subir ont pour objet :

1° **De supprimer la surchauffe,** autrement dit de régénérer le métal en provoquant une cristallisation plus fine. Ce résultat s'obtiendra par la trempe.

2° **De durcir la couche cémentée** par une trempe opérée à température convenable. Or, une pièce cémentée se compose de deux aciers : en surface, acier dur avec point de transformation à 720°, au centre acier doux avec point de transformation à 875°.

Pour régénérer le métal, il est nécessaire de le tremper à une température supérieure au point de transformation de l'acier doux, soit à 925 ou 950°. Après cette opération, tout le métal est régénéré, mais la couche cémentée, trempée trop à sec, est devenue très fragile.

Une seconde trempe est donc nécessaire, à une température supérieure au point de transformation de l'acier dur, soit 750°.

Ensuite, un revenu à 175° atténue les tensions et diminue la fragilité de la couche cémentée.

En résumé, le traitement recommandé comprend une double trempe et un revenu :

a) **Trempe à 950°** pour régénérer le métal.

b) **Trempe à 750°** pour durcir correctement la couche cémentée.

c) **Revenu** pour diminuer la fragilité.

La *figure* 32 résume les traitements thermiques que peuvent subir les pièces cémentées. Elle met en évidence les avantages du traitement préconisé.

5° Réemploi du cément.

Le cément usagé peut être régénéré par addition de 10 % de cément neuf, si les pièces sont refroidies en caisse, et de 25 % si la trempe se fait au sortir de la boîte. Le calibrage des grains de cément, qui facilite la circulation des gaz, permet une mise en température plus rapide ; il doit s'effectuer par tamisage.

6° Accidents de cémentation.

Ils peuvent être assez fréquents si l'opération n'est pas conduite avec beaucoup de soin.

a) *Insuffisance de dureté superficielle.*

Elle peut provenir :

a) de la mauvaise qualité, de l'épuisement du cément ou de l'emploi de céments en poussière ;

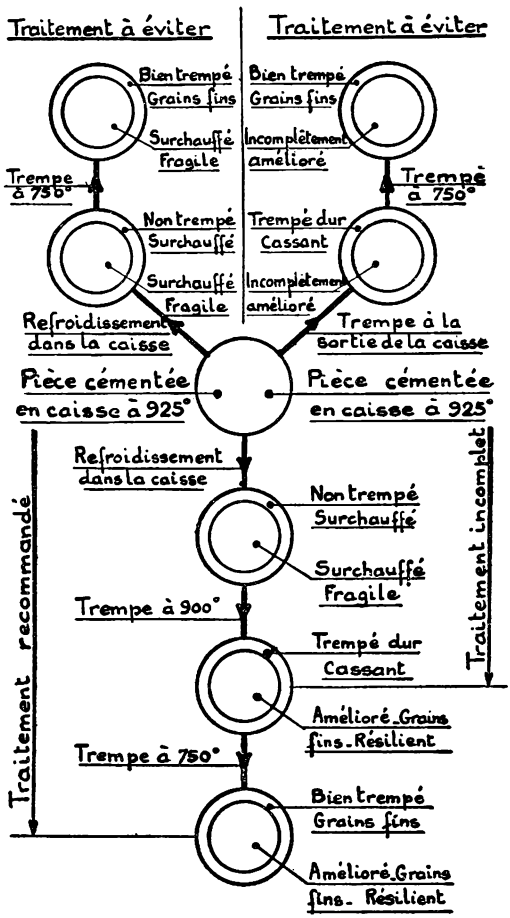


Fig. 32. — Traitements thermiques après cémentation.

b) d'une température de cémentation insuffisante ;

c) d'une décarburation des pièces pendant le refroidissement qui suit la cémentation, lorsque les pièces ont été enlevées chaudes de la caisse ;

d) d'une diffusion du carbone périphérique dans la masse si, pour la trempe de régénération, le métal est resté trop longtemps au-dessus du point de transformation.

b) ***Insuffisance de profondeur.***

Elle peut provenir :

a) de l'emploi d'un cément trop brusque qui s'épuise dès le début ;

b) du manque d'étanchéité des caisses de cémentation, ce qui provoque la perte des gaz actifs.

c) ***Fragilité de la couche cémentée.***

Elle résulte d'un trop fort pourcentage de carbone ou d'une mauvaise liaison du noyau à la couche cémentée. La cause en est dans :

a) l'emploi d'un cément brusque ;

b) la trop haute température de cémentation.

d) ***Fragilité du noyau.***

Elle provient d'une trempe de régénération à trop basse température, au-dessous du point de transformation de l'acier pour cémentation ; le traitement n'a pu, de ce fait, supprimer la surchauffe.

e) ***Irrégularité de cémentation.***

a) **Parmi les pièces d'une même caisse.**

Les différentes parties d'une pièce peuvent présenter des points mous ; la dureté d'une pièce peut être moins grande que celle des autres pièces de la même caisse.

Ces défauts peuvent avoir pour origine :

— les impuretés du métal (oxydes, sulfures) ou les plaques de calamine ou de rouille ;

— le contact des pièces avec des impuretés contenues dans le cément (terre, oxydes) ;

— la circulation insuffisante des gaz, lorsqu'il existe des substances pulvérisées parmi les grains de cément.

b) **D'une caisse de cémentation à une autre.**

Irrégularité dans la température du four : four mal construit, brûleurs mal réglés, porte trop souvent ouverte.

c) **D'une cémentation à une autre.**

Epuisement du cément qui n'a pas été régénéré ni débarrassé des poussières.

7° Cémentation au ferrocyanure de potassium.

Le ferrocyanure, vendu sous le nom de prussiate, est une poudre jaunâtre. Il est utilisé comme cément brusque lorsqu'on désire obtenir rapidement une couche très dure sur un organe de machine ou un outillage.

La pièce étant chauffée au-dessus de son point de transformation, on saupoudre la partie à cémenter avec le ferrocyanure ; on la maintient un peu en température avant de tremper.

L'action du ferrocyanure ne s'exerce que sur une couche très mince (1 à 2/100 de mm) et, comme pour la cyanuration, le durcissement résulte de la pénétration du carbone et surtout de l'azote. Comme ce dernier corps agit à partir de 500°, on n'a pas besoin de chauffer exagérément les pièces.

La faible épaisseur de la couche durcie interdit toute rectification après l'opération.

Cette cémentation, utilisée dans certains ateliers d'artisans, ne saurait en aucun cas remplacer la cémentation en caisse ou la cémentation au bain.

F. — La cémentation liquide

1° La cyanuration.

Tous les céments liquides utilisés contiennent, en plus ou moins grande quantité, du cyanure de sodium, composé chimique qui contient du carbone, de l'azote et du sodium : formule C N Na. Le cyanure de sodium, sel blanchâtre qui fond à 560°, dégage en quantité, vers 850°, des vapeurs nocives ; pour pouvoir l'utiliser, on le mélange à des corps inertes (chlorure de sodium, par exemple), qui ont pour effet d'en élever le point de fusion. La proportion du mélange en cyanure est d'environ 30 %.

Si on place un tel mélange de sels dans un four à creuset et qu'on chauffe jusqu'à 950°, on obtient un bain liquide qui dégage relativement peu de vapeurs irritantes, lesquelles s'évacuent d'ailleurs facilement au moyen d'une hotte et d'un aspirateur centrifuge.

En plongeant dans ce bain une pièce d'acier doux pour cémentation, il se forme très rapidement une couche cémentée, extrêmement dure après trempe, dont l'épaisseur au bout d'une heure est à peu près 0,4 mm. Ensuite la profondeur cémentée n'augmente que très lentement.

On estime qu'au contact de l'oxygène de l'air, le cyanure donne naissance à de l'azote libre et à de l'oxyde de carbone. Cet oxyde de carbone agit sur le fer comme dans la cémentation solide pour fournir du carbure de fer, tandis que l'azote donne un nitrure de fer, corps très dur mais très fragile.

L'action de l'azote commence dès 500°, tandis que le carbone n'agit qu'au-dessus du point de transformation de l'acier, soit vers 875°. On a constaté que la couche

cyanurée est, après trempe, beaucoup plus dure que celle à laquelle donne naissance la cémentation solide. Mais elle est très fragile en raison de la présence du nitrure de fer.

Ce procédé de durcissement de l'acier porte le nom de *cyanuration*. L'emploi de la cyanuration a été limité au traitement de petites pièces qui ne sont soumises ni à des chocs, ni à des efforts brusques : pièces de machines à coudre, à écrire, axes et engrenages de petites dimensions.

Notons que le pourcentage de carbone de la couche cémentée est de 0,6 à 0,7 %. La trempe de durcissement doit être faite à 775° ; comme l'opération est rapide (1 heure environ) le métal n'est pas surchauffé et il n'est pas nécessaire d'effectuer au préalable une trempe de régénération.

2° La cémentation liquide proprement dite.

Elle présente à la fois les avantages de la cémentation solide (couche cémentée peu fragile, le cas échéant assez épaisse) et de la cyanuration (opération rapide sans surchauffe du noyau).

a) *Le cément.*

Les céments qui sont utilisés fondus au creuset doivent leur pouvoir carburant au carbone extrêmement divisé mis en suspension dans le bain. Ils contiennent également du cyanure dont le rôle est d'accélérer la diffusion du carbone dans l'acier. Le *perlitex* des établissements Houghton en contient 40 à 45 % et le *carbogène* 10 à 12 %.

Les céments liquides, dont la température d'utilisation est comprise entre 850° et 950°, sont utilisés pour le traitement des aciers doux et des aciers spéciaux au nickel ou au nickel-chrome.

b) *Vitesse de pénétration.*

Très rapide au début, elle permet d'obtenir, à 925°, sur un acier au carbone pour cémentation, une profondeur de 0,5 mm après 3/4 d'heure, de 1 mm après 2 heures. La vitesse de pénétration diminue très sensiblement ensuite, puisqu'il faut 6 heures pour une profondeur de 2 mm et 12 heures pour une profondeur de 3 mm.

c) *Mode opératoire.*

Le cément liquide, fondu dans un creuset en tôle d'acier inoxydable soudée à l'arc, n'émet pas de vapeurs toxiques et le four peut être utilisé sans hotte et dans n'importe quel atelier.

Lorsque le bain est à la température de 875° pour les aciers au nickel-chrome ou de 925° pour les aciers au carbone, on immerge les pièces fixées par un

fil de fer à un support spécial pouvant être accroché à un appareil de manutention (pour les petites pièces ce support est simplement constitué par une barre reposant sur les bords du creuset, *fig.* 33).

Les pièces introduites dans le bain doivent être bien sèches afin d'éviter toute projection. Le cément étant très fluide, l'équilibre de température s'établit rapidement entre les pièces et le bain. Toutes les pièces traitées sont donc à la même température et la cémentation est ainsi très uniforme.

La température est contrôlée par une canne pyrométrique plongeant dans le bain.

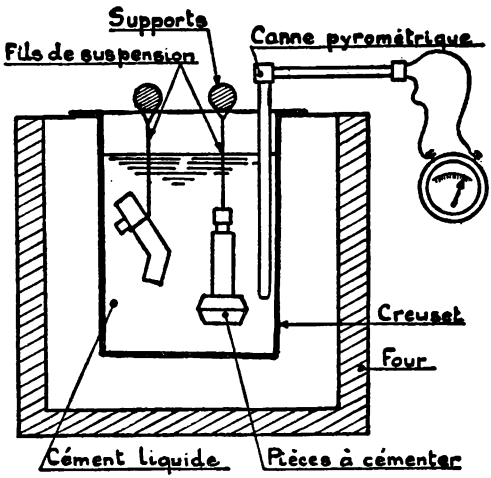


Fig. 33. — Bain de cémentation.

d) *Traitement thermique après cémentation.*

La durée de cémentation étant faible, le métal n'est pas surchauffé, son grain n'a pas eu le temps de grossir, et une trempe au sortir du bain est suffisante pour donner aux pièces la dureté et la résilience maxima. Cependant, pour que la trempe ait lieu à une température plus précise, on peut laisser refroidir les pièces au sortir du creuset, puis les réchauffer à 750° et les tremper à l'eau pour les aciers au carbone, à l'huile pour les aciers au chrome-nickel.

Un revenu à 175° est avantageusement pratiqué pour donner le maximum de résilience.

3° Accidents de cémentation.

Ils sont assez rares, car la température des pièces est homogène.

1° **Un manque de dureté** peut provenir :

a) d'une trempe effectuée à trop basse température : les pièces étant retirées du bain, on a trop attendu avant de les plonger dans le liquide de trempe ;

b) d'un cément épuisé. Il est recommandé de régénérer le bain en ajoutant, après chaque opération, 5 à 10 % de cément neuf ;

c) d'une température de cémentation trop basse.

2° **Des points mous, constatés à la surface des pièces,** peuvent avoir pour cause :

a) un manque d'homogénéité du métal qui présente en surface des oxydes ou sulfures ;

b) le fait que le liquide de cémentation ne mouille pas complètement le métal : contact de deux pièces, d'une pièce et du creuset, poches d'air emprisonnées dans les parties creuses des pièces.

3° **Le manque de profondeur de la couche cémentée** peut être imputable :

a) à l'emploi d'un cément épuisé ;

b) à une durée ou à une température de cémentation trop faibles ;

c) au fait que les pièces à cémenter sont trop fortement écrouies (utilisation d'étiré ou de laminé).

4° **Une fragilité excessive** est le résultat :

a) d'une trempe à trop haute température ;

b) d'une cémentation trop brusque à température trop élevée ;

c) d'un excès de cyanure dans le cément.

G. — La cémentation gazeuse

Le procédé de cémentation gazeuse est un procédé rapide, précis, économique, qui est surtout applicable aux productions de grande série.

Les fours sont constitués par un moufle en alliage réfractaire, chauffé de l'extérieur, dans lequel les pièces à carburer passent sur des transporteurs à galets de roulement. Le moufle est alimenté en gaz de cémentation; deux sas, à l'entrée et à la sortie du four, s'opposent aux pertes de gaz et à l'entrée de l'air extérieur.

Le gaz de cémentation est un mélange de gaz carbonique CO_2 et d'hydrocarbures.

La vitesse de cémentation est de 4/10 de mm à l'heure. La température de cémentation est de 930°.

On peut aussi effectuer une cémentation localisée, en utilisant comme gaz de cémentation l'acétylène C_2H_2. Elle se fait surtout au chalumeau oxyacétylénique. On chauffe d'abord la pièce au moyen de la flamme réglée pour donner une combustion complète, puis on donne un excès d'acétylène qui produit la cémentation. Avec une installation à plusieurs becs, on peut réaliser d'une façon à peu près uniforme la cémentation d'une partie de pièce. Le durcissement du métal est obtenu par trempe, comme dans les autres procédés.

H. — Les réserves de cémentation

Les pièces qui ne présentent qu'une ou plusieurs parties cémentées (cas le plus général) sont obtenues par deux méthodes.

Première méthode.

On cémente toute la pièce et on enlève avant la trempe, à l'outil, la couche cémentée sur les parties où elle ne doit pas exister ; il est bien évident qu'à l'ébauche initiale, on laisse la surépaisseur de métal correspondante.

L'enlèvement de la couche cémentée constitue une opération d'usinage supplémentaire qui nécessite l'emploi d'outils et l'adoption de vitesses de coupe correspondant au travail de l'acier dur. Cette méthode ne pourra donc être économiquement employée que si les parties à ne pas cémenter sont de faible importance.

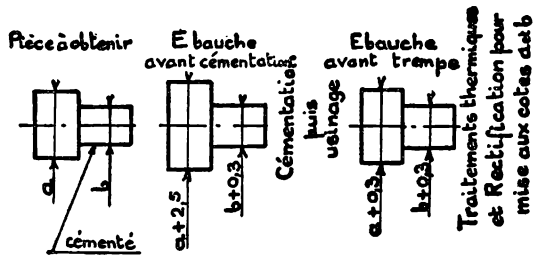


Fig. 34. — Gamme de fabrication d'une pièce cémentée.

Deuxième méthode.

On ne cémente que les parties à durcir.

a) Si ces parties sont placées à l'extrémité de la pièce et si l'on procède par cémentation liquide, on pourra ne plonger dans le bain que le bout des pièces.

b) Un enduit isolant, placé sur les parties qui doivent rester douces, s'oppose à la pénétration du carbone, dans les cas où la méthode précédente ne peut être prévue.

Il existe deux sortes d'isolants :

1° **Isolants non métalliques.**

L'argile peut être utilisée si elle est assez maigre pour ne pas se fendiller au feu. On entoure les parties à protéger d'une couche de 4 ou 5 mm d'argile, maintenue par une ligature en fil de fer ou une garniture de tôle.

Un mélange de 1/3 d'amiante, finement pulvérisée, et de 2/3 de silicate de soude donne une pâte qui, appliquée sur les parties à préserver avec une épaisseur de 1 mm, résiste bien aux températures de cémentation.

De même, un mélange dans les mêmes proportions d'alumine et de silicate de soude donne de bons résultats, s'il est appliqué sur une épaisseur double, soit 2 mm.

2° **Isolants métalliques.**

Les métaux utilisés sont : le cuivre pour la cémentation solide et le chrome pour la cémentation liquide, car le cyanure attaque le cuivre.

Ces métaux peuvent être utilisés pour l'exécution d'enduits que l'on dispose comme les précédents sur les parties à protéger. Voici la composition d'un enduit qui donne de bons résultats : 50 % de potée d'émeri n° 000 + 50 % de limaille de cuivre très fine, le tout délayé dans du silicate de soude pour donner une pâte assez consistante.

Le plus souvent, le cuivre et le chrome sont déposés par électrolyse du sulfate de cuivre ou de chrome.

Les pièces sont immergées dans une solution de sulfate et le courant électrique (courant continu) arrive par une anode de métal (cuivre ou chrome) plongeant dans le bain. Les pièces sont réunies électriquement à la borne de sortie et servent de cathode.

Le passage du courant a pour effet de provoquer sur ces pièces un dépôt métallique (cuivre ou chrome). L'opération dure environ 15 minutes et est arrêtée lorsque l'épaisseur déposée est de 1 à 2/100 de mm. L'intensité du courant doit être assez faible (de 3 à 5 ampères par dm² de surface à recouvrir).

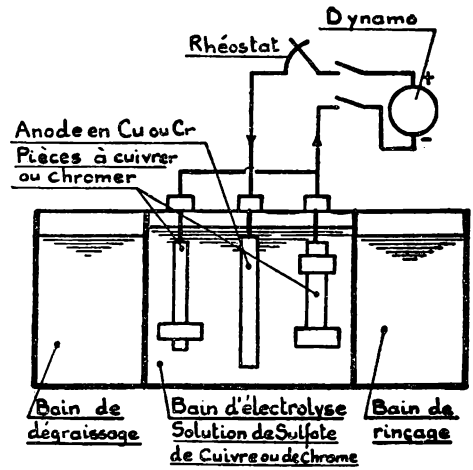


Fig. 35. — Installation de cuivrage ou de chromage.

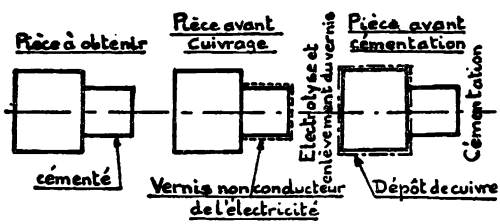


Fig. 36. — Préparation des réserves de cémentation.

Pour que le métal adhère bien aux pièces, celles-ci doivent être, au préalable, dégraissées dans un bain spécial (en général à base de trichloréthylène). Après électrolyse, les pièces sont rincées. On évite la formation du dépôt métallique sur les parties à cémenter, en recouvrant celles-ci d'un vernis spécial, non conducteur de l'électricité, constitué par de la résine, de la paraffine et de la cire.

Cet enduit est enlevé avant cémentation.

I. — Contrôle de la dureté après cémentation

On ne peut pas mesurer la dureté des pièces cémentées par la méthode Brinell, car la bille, soumise à un effort important, défoncerait la couche cémentée.

Les appareils permettant la mesure du nombre Rockwell sont utilisés, mais risquent de donner des résultats inexacts si la couche cémentée est trop mince.

Une machine Rockwell ne permet des mesures exactes sous 600 N que si la couche a une épaisseur de plus de 2/10 de mm, et sous 1500 N que si l'épaisseur dépasse 9/10 de mm.

Il existe, pour les faibles épaisseurs, des machines spéciales : Microduromètre EP (charge 50 N), et Rockwell superficiel (charge 100 N) permettant de mesurer la dureté de couches de 1 à 2/10 de mm. On peut également utiliser la machine de Vickers.

La dureté des pièces cémentées est de l'ordre de 65 Rockwell C (charge 600 N) ou de 280 Brinell-Vickers. Il est à noter que la dureté se mesure également en utilisant un jeu de limes étalonnées.

J. — Applications de la cémentation

La cémentation est appliquée sur les parties des organes de machines appelées à supporter des efforts brusques ou des chocs et qui sont soumises à des frottements importants : arbres à cames, axes, leviers, engrenages, fusées d'essieux, soies de vilebrequins, appareils de mesure, outillage, poinçons et matrices, montages d'usinage, etc.

La cémentation solide est surtout réservée pour les pièces travaillant aux chocs.

La cémentation liquide est appliquée aux organes qui ne doivent pas avoir une couche durcie trop résiliente. Comme il est possible de limiter l'importance des déformations dues à la chauffe par une suspension convenable des pièces dans le cément liquide, on réserve ce mode de durcissement aux organes de forme délicate.

LA NITRURATION

A. — Définition

La nitruration est un procédé de durcissement superficiel des aciers. Ce traitement est comparable à la cémentation puisque, dans les deux cas, on cherche à donner à des pièces peu fragiles une grande dureté superficielle.

Principe.

L'agent de durcissement du métal est l'azote qui, au-dessus de 500°, donne avec le fer du nitrure de fer, corps extrêmement dur mais fragile. La réaction se trouve nettement accélérée s'il s'agit d'azote naissant. On choisit donc un composé azoté dont le contact avec le fer libère de l'azote. C'est le gaz ammoniac qui est utilisé comme agent de nitruration. Il doit baigner les pièces qui sont portées à une température de 550°. Au contact du fer le gaz ammoniac se dissocie en azote et hydrogène. Une partie de l'azote est absorbée par le métal tandis que l'hydrogène, l'ammoniac non dissocié et l'azote en excès sont évacués.

La dureté de la couche nitrurée est obtenue sans trempe.

B. — Aciers spéciaux et fontes pour nitruration

La pénétration de l'azote dans les aciers au carbone est très rapide et se fait jusqu'à cœur. Il se forme, dans toute la masse, des aiguilles de nitrure de fer qui rendent les pièces extrêmement fragiles.

L'addition d'aluminium dans l'acier permet de limiter la pénétration de l'azote ; le nitrure de fer se trouve concentré sur une faible épaisseur et donne une très grande dureté superficielle.

Les *aciers pour nitruration* contiennent 1 à 1,5 % d'aluminium. Ils peuvent contenir également du chrome (2 %), du nickel (1 à 2 %) et du molybdène (0,5 %). Le molybdène et le nickel combattent l'écaillage des angles vifs et la diminution de résilience du noyau, résultant du chauffage prolongé.

On peut également appliquer la nitruration aux aciers inoxydables au nickel-chrome qui peuvent être utilisés pour la fabrication de soupapes de moteur.

Pour que le noyau présente ses caractéristiques maxima, on fait subir aux pièces, qui doivent être nitrurées, une trempe à l'huile suivie d'un revenu à 500°. Le métal possède alors une résistance de 900 N/mm², une résilience de 160 J/cm² et un allongement de 16 %. L'*état recuit* des aciers n'est pas favorable à l'obtention d'une couche nitrurée convenable.

Les *fontes pour nitruration* contiennent également du chrome et de l'aluminium.

Ces fontes subissent aussi, avant nitruration, une trempe et un revenu qui leur donnent une texture fine et homogène permettant d'obtenir une couche extérieure dure et tenace.

C. — Vitesse de pénétration

En pratique, lorsqu'il s'agit d'aciers spéciaux ou de fontes pour nitruration, on compte qu'une nitruration d'une durée de 10 heures fournit une couche nitrurée de 1/10 de mm. En général, on recherche une épaisseur nitrurée de 5/10 de mm qui est obtenue entre 65 et 70 heures de chauffage, temps compté à partir du moment où la température des pièces est supérieure à 500°. L'opération peut être interrompue, puis reprise sans inconvénient.

D. — Structure de la couche nitrurée

Des aiguilles de nitrure incrustées dans le métal forment la couche nitrurée, très dure mais très fragile. L'épaisseur pratiquement obtenue est de 5/10 de mm. La dureté diminue rapidement de l'extérieur vers l'intérieur, aussi ne peut-on enlever par rectification que 1/10 de mm.

Les arêtes vives des pièces sont à éviter, car elles constituent des parties fragiles susceptibles de s'écailler facilement.

E. — Traitements thermiques

Nous avons vu que la nitruration ne peut donner son maximum d'effet que si le métal a été trempé et revenu au préalable. Aucun traitement thermique n'est à pratiquer après nitruration. La dureté s'obtient donc sans trempe, ce qui est un grand avantage, car non seulement on réalise une économie de combustible et de main-d'œuvre, mais on évite toute oxydation du métal et toute déformation des pièces.

F. — Mode opératoire

Les pièces sont placées, sans aucune précaution spéciale, dans une caisse métallique obturée par un couvercle boulonné avec interposition d'un joint spécial qui lui assure une étanchéité parfaite. L'arrivée du gaz se fait par le bas et l'évacuation par le haut. Afin que les pièces soient uniformément baignées par le gaz, plusieurs orifices, convenablement répartis dans le bas de la caisse, peuvent être prévus. Des grilles, ou supports intermédiaires, permettent une répartition correcte des pièces (*fig.* 37).

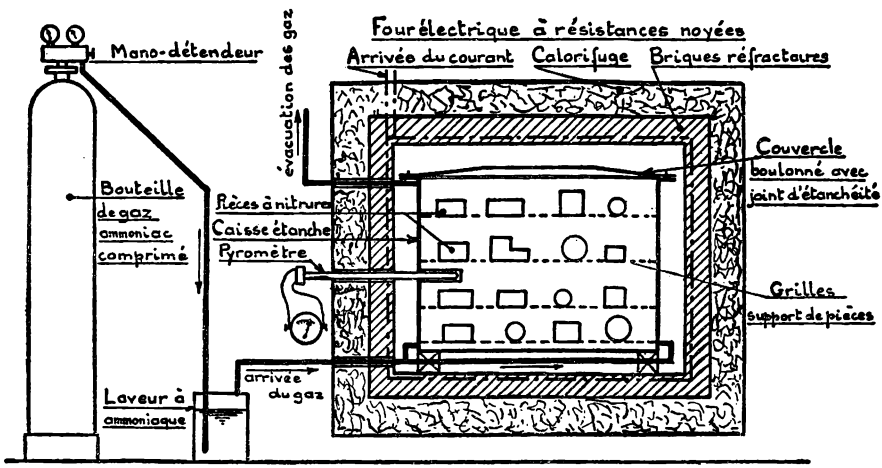


Fig. 37. — Schéma d'une installation de nitruration.

La caisse, les tubes d'arrivée, les grilles sont exécutés en acier inoxydable à haute teneur de chrome et de nickel. Ce métal présente l'avantage de ne pas se laisser pénétrer par l'azote et de ne pas provoquer la dissociation de l'ammoniaque.

Les caisses sont placées dans un four et portées à une température de 550°.

Une canne pyrométrique, plongeant par un tube borgne à l'intérieur d'une des caisses, permet de suivre la température.

1° Fours utilisés.

Les fours utilisés sont généralement des fours électriques fortement calorifugés et munis d'un dispositif de régulation de la température. La grande durée de l'opération (65 à 70 heures) rend ces appareils indispensables.

Le gaz ammoniac utilisé est généralement livré comprimé en bouteilles. Il doit être détendu à une pression de 10 à 20 g/cm² et lavé.

2° Conduite de l'opération.

La chauffe doit être rapide. On fait passer le gaz dans la caisse dès le début de la chauffe.

Le refroidissement se fera lentement, en atmosphère neutre, pour éviter l'oxydation (robinet fermé sur la tuyauterie d'évacuation). Lorsque les pièces sont à 100°, on peut les enlever des caisses.

G. — Protection contre la nitruration

On préserve contre la pénétration de l'azote les parties à ne pas nitrurer par simple *étamage* au fer à souder, par immersion dans un bain d'étain fondu, ou à l'aide d'une peinture constituée par de l'étain en poudre et du silicate de soude.

Comme l'étain fond à 235° et que la nitruration s'opère à 550°, il y a lieu de craindre :

a) que l'étain, en coulant, se répande sur les parties vierges, d'où manque de dureté en ces points ;

b) que soient nitrurées les surfaces d'où l'étain est parti.

Voici comment on peut éviter ces inconvénients :

Les caisses remplies de pièces à nitrurer sont chauffées de 210 à 220°. On suspend alors, pendant 15 minutes environ, l'arrivée du gaz ammoniac et on favorise l'entrée d'air qui a pour effet d'oxyder l'étain.

La couche d'oxyde d'étain qui se forme reste infusible jusqu'à la température de nitruration et assure une protection efficace.

H. — Avantages de la nitruration

1° **La dureté des aciers et fontes nitrurés est de beaucoup supérieure à celle des aciers trempés** ; voici quelques chiffres en dureté Vickers :

Aciers au carbone cémentés et trempés : 750 à 850.

Acier nitruré : 1 100 à 1 200.

Fonte grise : 210.

Fonte blanche : 500.

Fonte nitrurée : 800 à 1 000.

Les angles des pièces nitrurées rayent le verre.

2° **La résistance à l'usure par suite de cette grande dureté se trouve très augmentée et les qualités de frottement sont améliorées.**

La dureté acquise par nitruration se conserve jusqu'à 500° tandis que celle des aciers cémentés diminue rapidement à partir de 200°. Avec un acier nitruré, il y a donc diminution des risques de grippage.

3° **Les aciers nitrurés sont inoxydables à l'air humide et à l'eau douce.** On peut donc les utiliser quand on désire une très grande dureté alliée à une résistance à l'oxydation (pompes à eau). On sait en effet que les aciers inoxydables au chrome-nickel ne sont jamais bien durs.

4° **La nitruration s'effectuant à température relativement basse, aucune déformation des pièces n'est à craindre** si l'on a soin de ne soumettre à la nitruration que des pièces ne présentant aucune tension interne.

5° **Le traitement se faisant en atmosphère neutre, aucune oxydation du métal n'est à redouter.** La surface des pièces reste nette et prend une teinte gris argent. Aussi a-t-on pu faire subir ce traitement à des pièces terminées de rectification. Il y a lieu, dans ce cas, de tenir compte que la nitruration provoque un gonflement d'environ 2/100 de mm.

Si une grande précision est demandée, un usinage à la meule s'impose ; la profondeur de rectification après nitruration ne doit pas dépasser 1/10 de mm.

I. — Inconvénients de la nitruration

La nitruration est un traitement long et coûteux qui ne peut s'appliquer qu'à des pièces en acier spécial. La couche nitrurée, fragile, ne peut supporter de chocs. Les arêtes vives, en particulier, sont à éviter.

J. — Applications de la nitruration

Ce traitement thermique s'applique à des pièces de frottement fortement chargées et dont la couche durcie n'est pas susceptible de supporter des chocs : engrenages, poussoirs, cames, cages de roulement, galets, appareils de mesure, chemises amovibles pour cylindres de moteurs à explosion, pièces diverses pour machines à imprimer, outillages divers, montages d'usinage, cheminées de perçage, etc.

La nitruration est parfois employée en raison des avantages qu'elle présente sur la cémentation au point de vue de la déformation des pièces et de la multiplication de l'usinage et des traitements thermiques complémentaires (trempe). Malheureusement, elle ne peut être appliquée sur tous les aciers et, comme elle est onéreuse, on lui préfère d'autres procédés (notamment lorsqu'il s'agit de pièces de frottement) : la cémentation par le soufre ou *sulfinisation.*

LA SULFINISATION

La sulfinisation ou *cémentation par le soufre* communique à la surface des pièces traitées une haute résistance à l'usure, sans accroissement de dureté. Elle s'applique à tous les métaux ferreux : aciers de construction, d'outillage, aciers de coupe, aciers rapides, fontes diverses.

A. — Mode opératoire

— Les pièces sont chauffées dans un creuset contenant du cyanure et des sels dérivés du soufre (sulfite de sodium notamment).
Les sels sont portés à une température inférieure au point de transformation A_{c1} des aciers à traiter, soit 560 à 580° pour les aciers au carbone.
La durée de l'opération est de 3 heures au maximum.

— Le refroidissement se fait dans de l'eau très chaude (à 80°).

— Après traitement, les pièces sont recouvertes d'un dépôt rugueux de sels solidifiés que l'on peut enlever par brossage ou sablage.

B. — Résultats obtenus

L'épaisseur de la couche sulfinisée est de 0,3 mm. On a constaté un gonflement de l'acier de 0,01 mm.

Le traitement se fait sur pièces usinées avec 2 à $\frac{3}{100}$ de mm de surépaisseur, afin de permettre une rectification sur les parties de contact et de frottement.

La bonne résistance au frottement résulte probablement de la porosité de la couche traitée, qui est particulièrement favorable au graissage, ainsi que des qualités frottantes des composés complexes constituant la pellicule sulfinisée.

Ce traitement de surface est surtout utilisé pour les pièces de frottement, pièces servant de contact mobile : patins, coussinets, disques de frein, glissières de machines, outils de coupe. Il trouve de plus en plus d'emplois parce qu'il peut être appliqué à tous les alliages ferreux et qu'il ne provoque pas de déformations, en raison de la température moyenne de chauffage.

LA CARBONITRURATION

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel de pièces en acier, chauffées dans une atmosphère gazeuse permettant au métal d'absorber du carbone et de l'azote. Le durcissement est ensuite obtenu par trempe. L'atmosphère gazeuse est un mélange d'oxyde de carbone et de gaz ammoniac.

L'oxyde de carbone peut être fourni par du gaz d'éclairage ; il peut provenir d'un gazogène dans lequel on craque un hydrocarbure, entre 1 000 et 1 200°, en présence d'air et d'un catalyseur à base de nickel.

Le procédé est donc un compromis entre la cémentation et la nitruration ; le durcissement provient surtout de la cémentation par carburation de la couche extérieure de la pièce. Le rôle de l'azote est surtout d'abaisser le point de transformation A_{c3}, ce qui permet d'obtenir une température de chauffage et de trempe moins élevée que pour la cémentation : 700 à 875°.

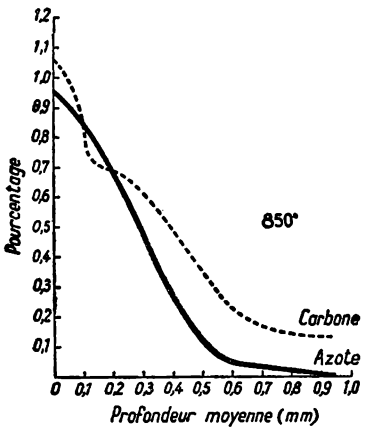


Fig. 38. — Concentrations de carbone et d'azote obtenues, au bout de 3 heures de carbonitruration, à 850° sur un acier au carbone.

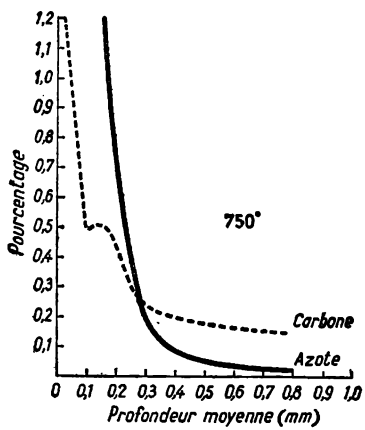


Fig. 39. — Concentrations de carbone et d'azote obtenues à 750°, sur le même acier et au bout du même temps de carbonitruration.

Une trempe peu énergique, à l'huile ou à l'air, est suffisante pour obtenir une dureté maximum : HRC = 62.

La vitesse de pénétration du carbone et de l'azote se trouve considérablement ralentie quand l'épaisseur de la couche cémentée atteint 0,5 mm.

Une épaisseur cémentée de 0,5 à 0,7 mm suppose un traitement d'une durée de 2 à 3 heures.

La température influe sur l'épaisseur de la couche cémentée, ainsi que le pourcentage de gaz ammoniac. Les résultats comparatifs sont donnés sur les courbes (*fig.* 38 et 39) représentant, pour un même acier, les concentrations de carbone

et d'azote obtenues, au bout de 3 heures de traitement dans une atmosphère gazeuse contenant du gaz de ville et 10 % de gaz ammoniac, pour des températures de 750 et 850°.

Le *tableau ci-dessous* montre l'influence de la concentration en ammoniaque sur l'épaisseur de la couche carbonitrurée, la durée de traitement étant de 3 heures :

% NH_3	Épaisseur de la couche en mm a		
	850°C	800°C	750°C
10	0,75	0,60	0,45
17	0,75	0,65	0,45
25	0,825	0,75	0,55

On utilise, pour la carbonitruration, des fours à chauffage électrique et à circulation calorifique forcée (*voir fig. 17 bis*).

La comparaison de la carbonitruration et de la cémentation gazeuse conduit aux observations suivantes :

— La carbonitruration s'effectuant à plus basse température, la durée du four est augmentée, la consommation en combustible diminuée : l'opération est plus économique.

— La trempe se faisant à vitesse moins grande, les déformations des pièces sont moins importantes.

— La résistance à l'usure du métal carbonitruré est plus grande que celle de l'acier cémenté et trempé, en raison de l'action de l'azote qui vient heureusement compléter celle du carbone.

— Les réserves, en carbonitruration comme en cémentation, peuvent être obtenues par cuivrage.

— Étant donnée la faible épaisseur de la couche cémentée, il importe de prévoir une profondeur minimum de rectification (1/10 au maximum), ce qui est possible, en raison du peu de déformation des pièces carbonitrurées.

La carbonitruration est un traitement qui est de plus en plus adopté par les industries utilisant de la mécanique de précision : automobile, aviation, métrologie, etc.

◇

L'outil de coupe

Conditions de travail des outils

L'outil a la forme d'un coin que l'on fait pénétrer dans la pièce à tailler pour produire et enlever un copeau. L'énergie indispensable à cette opération empruntée au moteur électrique nécessite, pour se développer, deux mouvements en général simultanés, communiqués à la pièce et à l'outil, ou à l'outil seul, ou à la pièce seule :

— ***Un mouvement rapide de coupe :***

- — rotation de la pièce : machines à tourner ;
- — rotation de l'outil : machines à fraiser, percer, aléser, rectifier ;
- — translation rectiligne de la pièce : machines à raboter ;
- — translation rectiligne de l'outil : machines à brocher, étau-limeur ;
- — translation hélicoïdale : machines à tailler.

— ***Un mouvement d'avance lent :***

- — translation rectiligne le plus souvent, car généralement les guidages des tables et chariots sont des surfaces réglées ;
- — translation curviligne obtenue par combinaison de deux translations rectilignes : machines à copier ou à commande numérique ;
- — rotation : travail sur plateau circulaire.

Le mouvement d'avance peut être communiqué à l'outil (machines à tourner, fileter, percer, raboter) ou à la pièce (étau-limeur, machines à fraiser, tailler).

I. — ÉTUDE DES MOUVEMENTS DE COUPE ET D'AVANCE

Les mouvements de coupe et d'avance sont généralement des mouvements simultanés uniformes. Les échanges d'énergie se produisant dans la zone de contact pièce-outil, il est intéressant de connaître la vitesse de ces mouvements et leur représentation vectorielle. La forme de la partie active des outils, la définition de la position de l'outil par rapport à la pièce sont définies à partir de cette représentation vectorielle des vitesses.

Une machine-outil simple, **en action,** comporte trois éléments essentiels (voir *fig.* 1 et 2) :

— une pièce à usiner ①,

— un outil ②,

— un bâti ③,

— des organes de réception d'énergie électrique, de transformation de cette énergie en énergie mécanique cinétique et, de ce fait, produisant les mouvements de coupe et d'avance.

Le constructeur de machine-outil est intéressé par les mouvements de coupe et d'avance considérés par rapport au bâti ③ portant le référentiel $O_3X_3Y_3Z_3$ qui permettra d'écrire les équations des mouvements.

L'usineur s'occupe par contre du mouvement de l'outil ② par rapport à la pièce ① à laquelle est lié un second référentiel $O_1X_1Y_1Z_1$.

Nous ne nous intéresserons qu'à la détermination des vecteurs vitesse d'un point A commun à la pièce et à l'outil et appartenant à l'arête de l'outil. Nous raisonnerons à partir de deux exemples concrets.

1° Usinage au tour (fig. 1).

Nous affecterons un numéro à chacune des parties de l'ensemble : pièce ① ; outil ② et son support mobile ; bâti ③ support de la pièce, de l'outil et organes de transmission de l'énergie nécessaire à la coupe.

Soit A un point commun à la pièce ① et à l'outil ②.

— **Le mouvement de coupe M_c** est une rotation uniforme rapide communiquée à la pièce. Le vecteur vitesse du point A appartenant à la pièce ① et animé, par rapport au bâti ③, d'un mouvement de rotation, est le vecteur $\vec{V}^{A}_{1/3}$ tangent en A à la trajectoire circulaire du point A.

— **Le mouvement d'avance M_a** est une translation uniforme rectiligne lente, parallèle à l'axe de rotation de la pièce, qui est communiquée à l'outil ② et à son chariot support.

La vitesse du point A de l'outil ②, animé du mouvement d'avance et considéré par rapport au bâti ③, est le vecteur $\vec{V}^{A}_{2/3}$.

L'espace parcouru par l'outil pendant le temps que met la pièce pour faire un tour est l'épaisseur du copeau : si la pièce fait 300 tr/mn et si l'avance de l'outil est de 60 mm/mn, l'épaisseur du copeau est : 60/300 = 0,2 mm.

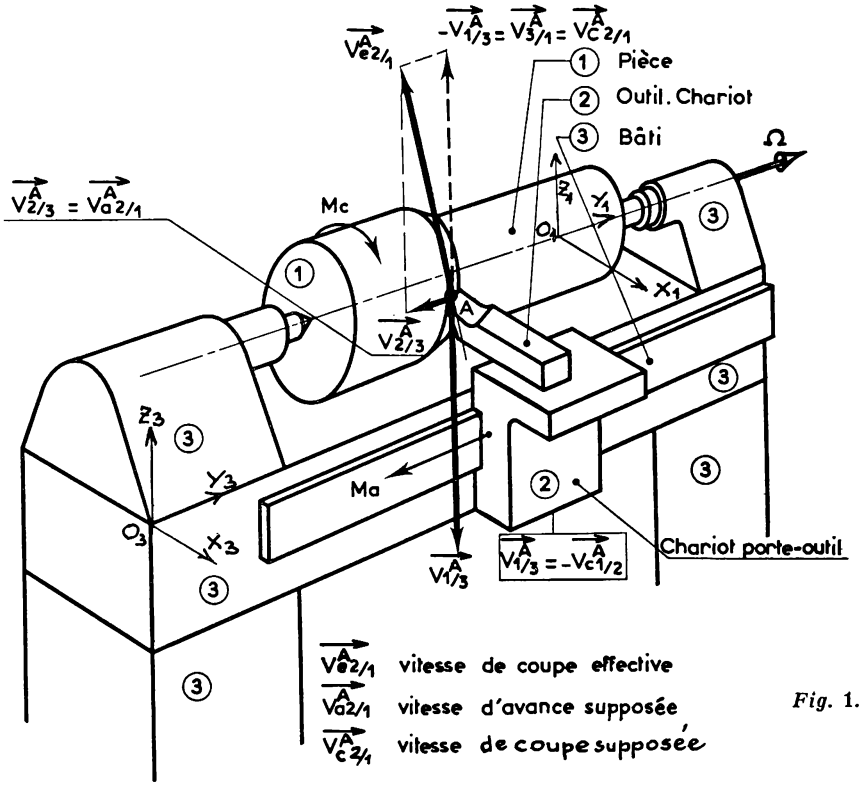


Fig. 1.

2° Usinage à la fraiseuse (fig. 2).

La pièce ① est fixée sur la table qui se déplace sur les glissières horizontales du bâti ③. La fraise ② est à axe vertical. Les axes de référence $O_3X_3Y_3Z_3$ sont liés au bâti ; les axes de référence $O_1X_1Y_1Z_1$ sont liés à la pièce.

— **Le mouvement de coupe** est une rotation uniforme rapide communiquée à l'outil ②. Le vecteur vitesse du point A appartenant à la fraise ②, animé par rapport au bâti ③ d'un mouvement de rotation, est le vecteur $\vec{V}^{A}_{2/3}$ tangent en A à la trajectoire circulaire du point A.

— **Le mouvement d'avance** est une translation uniforme rectiligne lente, communiquée à la pièce ① et à la table; elle est normale à l'axe de rotation de l'outil.

La vitesse de translation du point A de la pièce ①, animée du mouvement d'avance et considérée par rapport au bâti ③, est le vecteur $\vec{V}^{A}_{1/3}$.

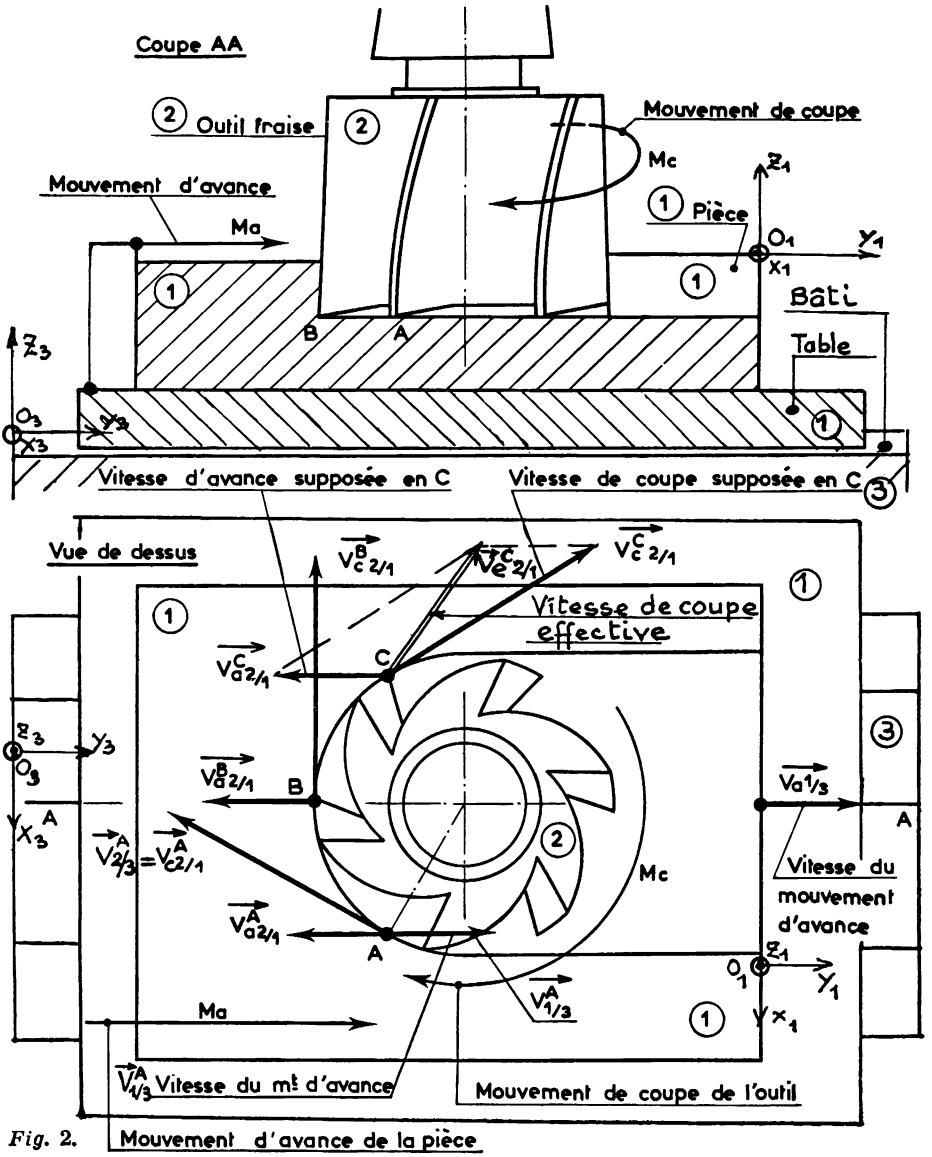


Fig. 2.

II. — VITESSES DE COUPE ET D'AVANCE

L'énergie nécessaire à la coupe est fonction de la vitesse relative de l'outil ② par rapport à la pièce ①. Cela revient à définir les vitesses dans le système de référence $O_1X_1Y_1Z_1$ lié à la pièce.

1° Vitesse effective de coupe.

La vitesse effective de coupe, pour le point A, est représentée par le vecteur $\vec{V}^{A}_{c2/1}$ et résulte du mouvement de coupe et du mouvement d'avance, donc des vitesses de ces mouvements $\vec{V}_{1/3}$ et $\vec{V}_{2/3}$. Faisons apparaître ces vecteurs en utilisant la relation vectorielle connue :

$$\vec{V}^{A}_{2/1} = \vec{V}^{A}_{2/3} + \vec{V}^{A}_{3/1}$$

Comme $\vec{V}^{A}_{3/1} = -\vec{V}^{A}_{1/3}$, cette relation devient:

$$\vec{V}^{A}_{2/1} = \vec{V}^{A}_{2/3} + (-\vec{V}^{A}_{1/3}) \qquad (1)$$

Le vecteur $\vec{V}^{A}_{2/1}$ est le vecteur qui représente la vitesse effective de coupe $\vec{V}^{A}_{c2/1}$, vitesse relative de l'outil ② par rapport à la pièce pendant le travail. Essayons de comprendre ce que représente la relation (1).

a) Cas du tour (fig. 1).

La pièce est animée du mouvement de coupe ; l'outil ② est animé du mouvement d'avance.

— Pour le point A de l'outil, $\vec{V}^{A}_{2/3}$ est la vitesse du mouvement d'avance **existant seul**. La pièce ①, comme le bâti ③, est immobile. On a : $\vec{V}^{A}_{2/3} = \vec{V}^{A}_{2/1}$. Cette vitesse est appelée **vitesse d'avance supposée** du point A de l'outil ② par rapport à la pièce ①. Elle est représentée par $\vec{V}^{A}_{a2/1}$. On a : $\vec{V}^{A}_{2/3} = \vec{V}^{A}_{2/1} = \vec{V}^{A}_{a2/1}$.

— Pour le point A de la pièce, $\vec{V}^{A}_{1/3}$ est la vitesse du mouvement de coupe quand celui-ci **existe seul**. L'outil ② est alors immobile comme le bâti ③. On a donc $\vec{V}^{A}_{1/3} = \vec{V}^{A}_{1/2}$, vitesse de la pièce par rapport à l'outil.

Par suite : $-\vec{V}^{A}_{1/3} = -\vec{V}^{A}_{1/2} = \vec{V}^{A}_{3/1} = \vec{V}^{A}_{2/1}$ car il s'agit de vecteurs opposés.

Le vecteur $\vec{V}_{2/1}$ est désigné par $\vec{V}^{A}_{c2/1}$ et est appelé **vecteur vitesse de coupe supposée** du point A de l'outil ② par rapport à la pièce ①.

La relation (1) s'écrit :

$$\vec{V}^{A}_{e2/1} = \vec{V}^{A}_{a2/1} + \vec{V}^{A}_{c2/1} \qquad (2)$$

Pour un point A commun à l'outil et à la pièce, le vecteur vitesse effective de coupe est la somme des vecteurs vitesse d'avance supposée et vitesse de coupe supposée.

b) Cas du fraisage (fig. 2).

L'outil est animé du mouvement de coupe et la pièce du mouvement d'avance.

— Pour le point A de la pièce, $\vec{V}^{A}_{1/3}$ est le **vecteur vitesse du mouvement d'avance** quand le mouvement de coupe **n'existe pas.** L'outil étant immobile ainsi que le bâti, $\vec{V}^{A}_{1/3} = \vec{V}^{A}_{1/2}$. Cherchons ce que représente le vecteur $-\vec{V}^{A}_{1/3}$ de la relation (1).

On a : $-\vec{V}^{A}_{1/3} = -\vec{V}^{A}_{1/2} = \vec{V}^{A}_{a2/1}$.

Le vecteur $\vec{V}^{A}_{a2/1}$ opposé à $\vec{V}^{A}_{1/3}$ est appelé **vecteur vitesse d'avance supposée** de l'outil ② par rapport à la pièce ① au point A.

Sur chaque lame, en B et C, nous avons tracé les vecteurs $\vec{V}^{B}_{a2/1}$ et $\vec{V}^{C}_{a2/1}$, de même mesure algébrique que $\vec{V}^{A}_{a2/1}$.

— Pour le point A de l'outil, nous avons tracé le vecteur $\vec{V}_{2/3}$ qui est le vecteur vitesse du mouvement de coupe quand le mouvement d'avance **n'existe pas.** Donc le bâti ③ et la pièce ① sont immobiles et on peut écrire :

$$\vec{V}^{A}_{2/3} = \vec{V}^{A}_{2/1} = \vec{V}^{A}_{c2/1}.$$

Le vecteur $\vec{V}^{A}_{c2/1}$ est le **vecteur vitesse de coupe supposée** du point A de l'outil ② par rapport à la pièce ①.

— Pour les points B et C de chacune des dents, nous avons tracé les vecteurs vitesse de coupe supposée $\vec{V}^{B}_{c2/1}$ et $\vec{V}^{C}_{c2/1}$.

La relation (1) nous permet de retrouver la relation (2) précédemment établie pour le tour, par exemple pour le point C :

$$\vec{V}^{C}_{e2/1} = \vec{V}^{C}_{a2/1} + \vec{V}^{C}_{c2/1}$$

qui se traduit par la construction graphique de la *figure* 2.

Pour simplifier l'écriture, nous désignerons :

— par $\vec{V}^{A}_{e}$ la **vitesse effective de coupe** du point A de l'outil ② par rapport à la pièce ① (M_c et M_a existent simultanément),

— par $\vec{V}^{A}_{c}$ la **vitesse de coupe supposée** du point A de l'outil ② par rapport à la pièce ① (M_c existe seul),

— par $\vec{V}^{A}_{a}$ la **vitesse d'avance supposée** du point A de l'outil ② par rapport à la pièce ① (M_a existe seul).

La géométrie des outils

I. — DÉFINITIONS RELATIVES A LA FORME GÉNÉRALE DES OUTILS

Un outil comporte un **corps,** barreau prismatique ou bloc cylindroconique (fraises), destiné à mettre en position et à fixer l'outil sur la machine.

Sur ce corps sont disposées ou taillées la ou les **parties actives,** celles qui sont destinées à favoriser la production des copeaux (*fig.* 3).

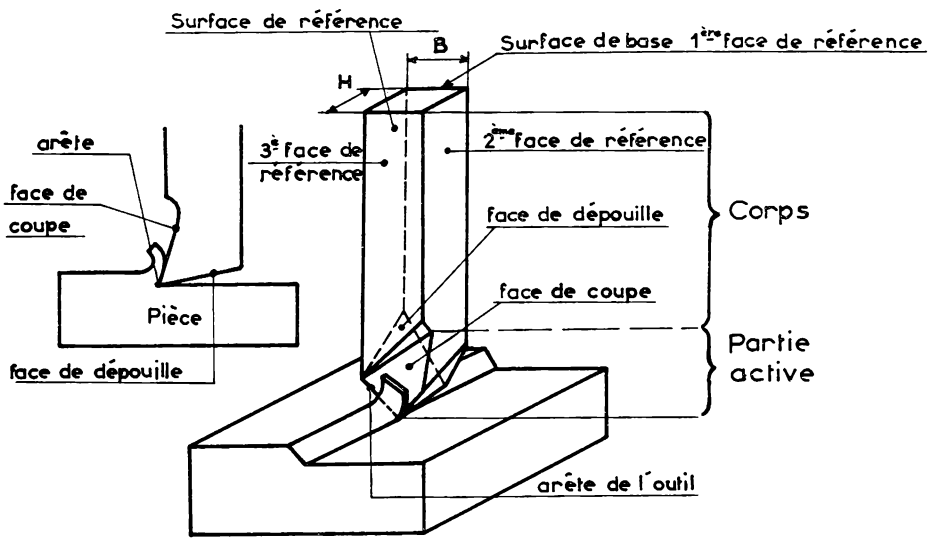


Fig. 3.

La **partie active** consiste essentiellement en deux surfaces : la **face de dépouille** et la **face de coupe;** l'intersection de ces deux faces est l'arête de l'outil.

La face de dépouille est placée du côté de la surface usinée. Sur la face de coupe glisse le métal taillé (copeau).

La partie active de l'outil doit avoir une dureté plus grande que le métal à travailler : aussi peut-elle être constituée par un alliage ou un métal différent de celui du corps.

Le corps de l'outil est **prismatique** ou **cylindrique.**

Il est le plus souvent prismatique parce que cela permet une facile immobilisation dans le support.

Un outil prismatique comprend deux surfaces planes de référence : l'une, opposée à l'arête tranchante, est la surface de base ; l'autre, adjacente au plan de base, lui est perpendiculaire.

L'intersection des faces latérales du prisme constitue les génératrices du corps de l'outil. Souvent on usine une troisième face parallèle à la seconde surface de référence.

Lorsque le corps de l'outil est cylindrique, la surface de référence est la surface cylindrique elle-même, qui est usinée. Un méplat réalisé sur le corps cylindrique permet de contrôler l'orientation de la partie active.

II. — CARACTÉRISTIQUES DE L'OUTIL

La recherche de la définition précise des angles caractéristiques de la partie active de l'outil et des faces de référence du corps d'outil, en vue de sa mise en place sur le support d'outil correspond à l'étude de « l'outil en main ».

L'examen de la situation de la partie active de l'outil pendant le travail constitue l'étude de « l'outil en travail ».

Nous donnerons la priorité à l'étude de « l'outil en main », car elle permet de définir l'outil en tant qu'objet à fabriquer et à placer sur une machine-outil.

Forme des faces de coupe, de dépouille et de l'arête.

La « face de coupe » et la « face de dépouille » d'un outil sont, chaque fois que cela est possible, une surface réglée, c'est-à-dire engendrée par une droite s'appuyant sur une droite ou une courbe.

Les surfaces réglées généralement adoptées sont le plan et l'hélicoïde : l'affûtage en est simple et le dégagement du copeau facilité.

Quand les faces de coupe et de dépouille sont planes, l'arête de l'outil est une droite : c'est la solution généralement adoptée pour les outils à charioter destinés à produire un travail d'enveloppe.

Lorsqu'on doit réaliser un travail de forme, l'arête de l'outil est courbe et la face de dépouille n'est plus plane mais peut rester une surface réglée. La face de coupe peut rester plane (*voir fig.* 4). Dans ce cas, l'arête est une courbe plane et la tangente en un point de l'arête est dans la face de coupe. La forme de l'arête est définie par l'intersection de la pièce supposée usinée et du plan constituant la face de coupe.

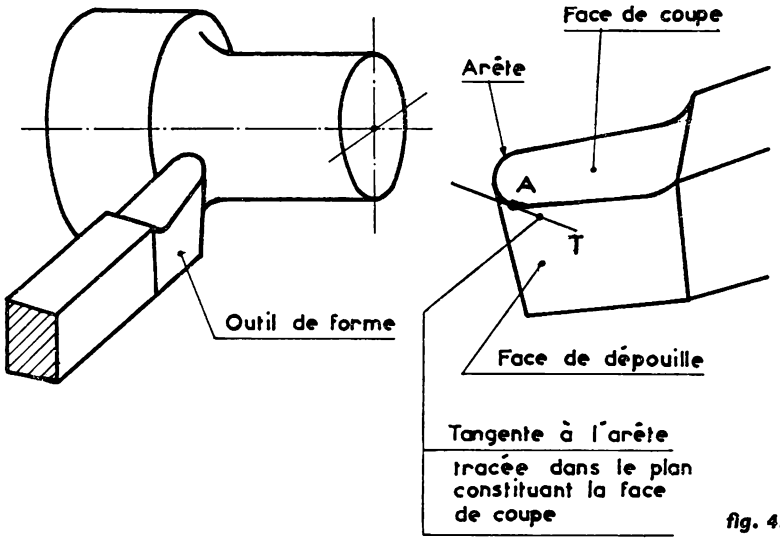


fig. 4.

III. — PLANS REMARQUABLES DE L'OUTIL

A. — Plans de l'outil en main (fig. 5)

Pour définir la partie active de l'outil et notamment la position relative des faces de dépouille et de coupe en un point A de l'arête, on utilise trois plans dont les droites d'intersection sont XX', YY', ZZ'.

— Droite ZZ' : elle est le support du vecteur vitesse de coupe supposée $\vec{V}^{A}_{c_2/1}$ de l'outil ② par rapport à la pièce ① ;

— Droite YY' : elle est le support du vecteur vitesse d'avance supposée $\vec{V}^{A}_{a_2/1}$;

— Droite XX' : elle est l'intersection du plan normal en A au vecteur $\vec{V}^{A}_{c_2/1}$ (plan P_r) et du plan P_s contenant $\vec{V}^{A}_{c_2/1}$ et la droite support de l'arête si elle est rectiligne, ou la tangente au point A à l'arête si elle est courbe.

On remarquera (*fig.* 5) que l'arête de coupe est supposée oblique par rapport à XX'.

Les plans caractéristiques de l'outil sont les suivants (*fig.* 5) :

1° **Plan de référence P_r :**

Il est perpendiculaire en A au vecteur vitesse de coupe $\vec{V}^A_{c2/1} = \vec{V}^A_c$. Il contient, le plus souvent, le vecteur vitesse d'avance $\vec{V}^A_{a2/1} = \vec{V}^A_a$, car les machines-outils sont organisées pour que $\vec{V}^A_c$ soit perpendiculaire au vecteur $\vec{V}^A_a$. Pour l'outil de tour, ce plan contient l'axe de la pièce.

2° **Plan d'arête P_s de l'outil** (fig. 5) :

Le plan d'arête P_s de l'outil en un point A de l'arête :

— contient l'arête de l'outil si elle est rectiligne (c'est le cas de la *figure* 5). ou la tangente en A à l'arête de coupe si celle-ci est curviligne ;

— est perpendiculaire au plan de référence P_r.

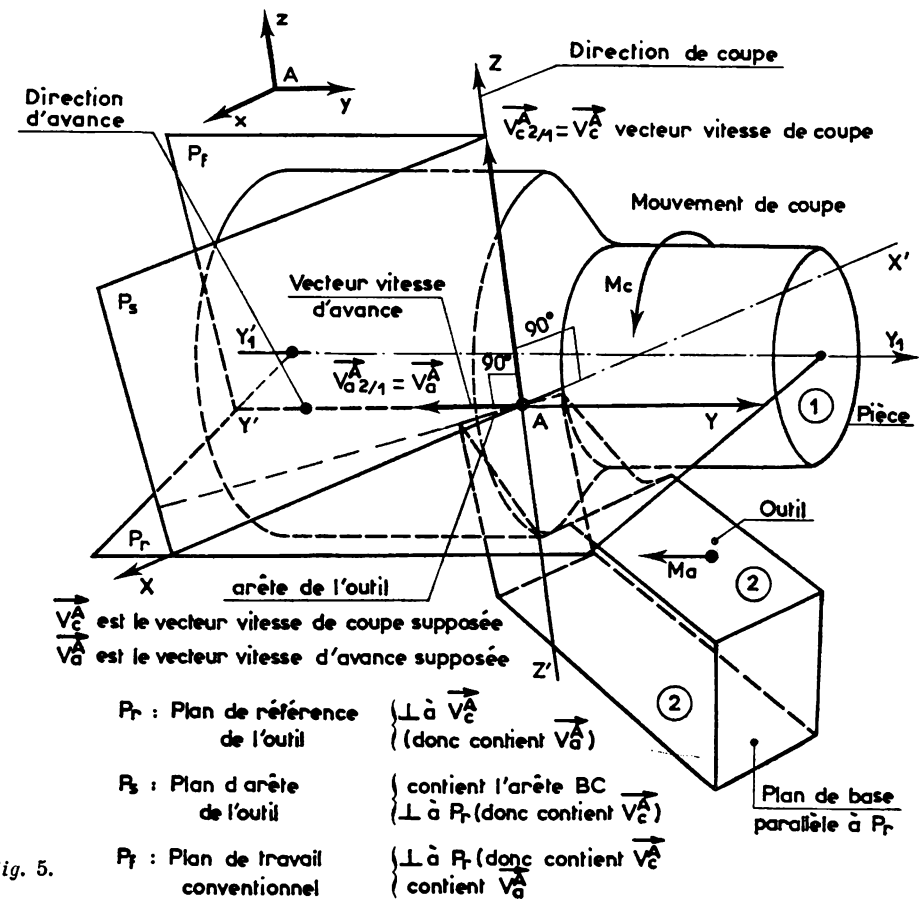


Fig. 5.

Il contient donc le vecteur vitesse de coupe supposée en A : $\vec{V}_c^A$ et son support ZZ'.

3° **Plan de travail conventionnel P_f** (fig. 5) :

Le plan de travail conventionnel P_f au point A de l'arête de l'outil :

— contient le vecteur vitesse d'avance $\vec{V}_a^A$ et son support YY' ;

— est perpendiculaire au plan de référence P_r et contient, de ce fait, le vecteur vitesse de coupe supposée $\vec{V}_c^A$ et son support ZZ'.

Les plans P_s et P_f ont comme intersection la droite ZZ', support du vecteur vitesse de coupe supposée $\vec{V}_c^A$.

B. — Position des faces extérieures des outils prismatiques par rapport aux plans remarquables des outils (fig. 6)

L'arête BC de cet outil est supposée située dans le plan de référence P_r correspondant au point A. Ce plan est aussi le plan de référence de tous les points de l'arête tranchante. Il contient l'axe de rotation Y'_1Y_1 de la pièce.

On verra plus loin que cet outil est dit avoir une **inclinaison d'arête nulle.**

Lorsqu'on construit ces outils, on prévoit que leurs plans de base seront disposés, dans le porte-outil, sur un plan parallèle au plan de référence correspondant aux différents points de l'arête de coupe.

Les plans de base sont alors perpendiculaires au support du vecteur $\vec{V}_c^A$.

Les arêtes du corps prismatique D_1E_1, D_2E_2, D_3E_3, D_4E_4 sont généralement disposées perpendiculaires au plan de travail P_f (plan contenant $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_a^A$).

Ainsi, les faces de référence $D_1E_1D_4E_4$ et $D_2E_2D_3E_3$ sont perpendiculaires au plan de travail.

Sur la vue en projection conventionnelle, les différents plans remarquables sont représentés par leur trace sur les plans de projection. On se rend compte que l'arête BC est dans le plan P_r et dans le plan P_s.

NOTA. — Sur la norme, la droite ZZ' est appelée *direction de coupe* et la droite YY' est appelée *direction d'avance.* Pour ne pas compliquer l'écriture, nous n'utiliserons pas ces appellations.

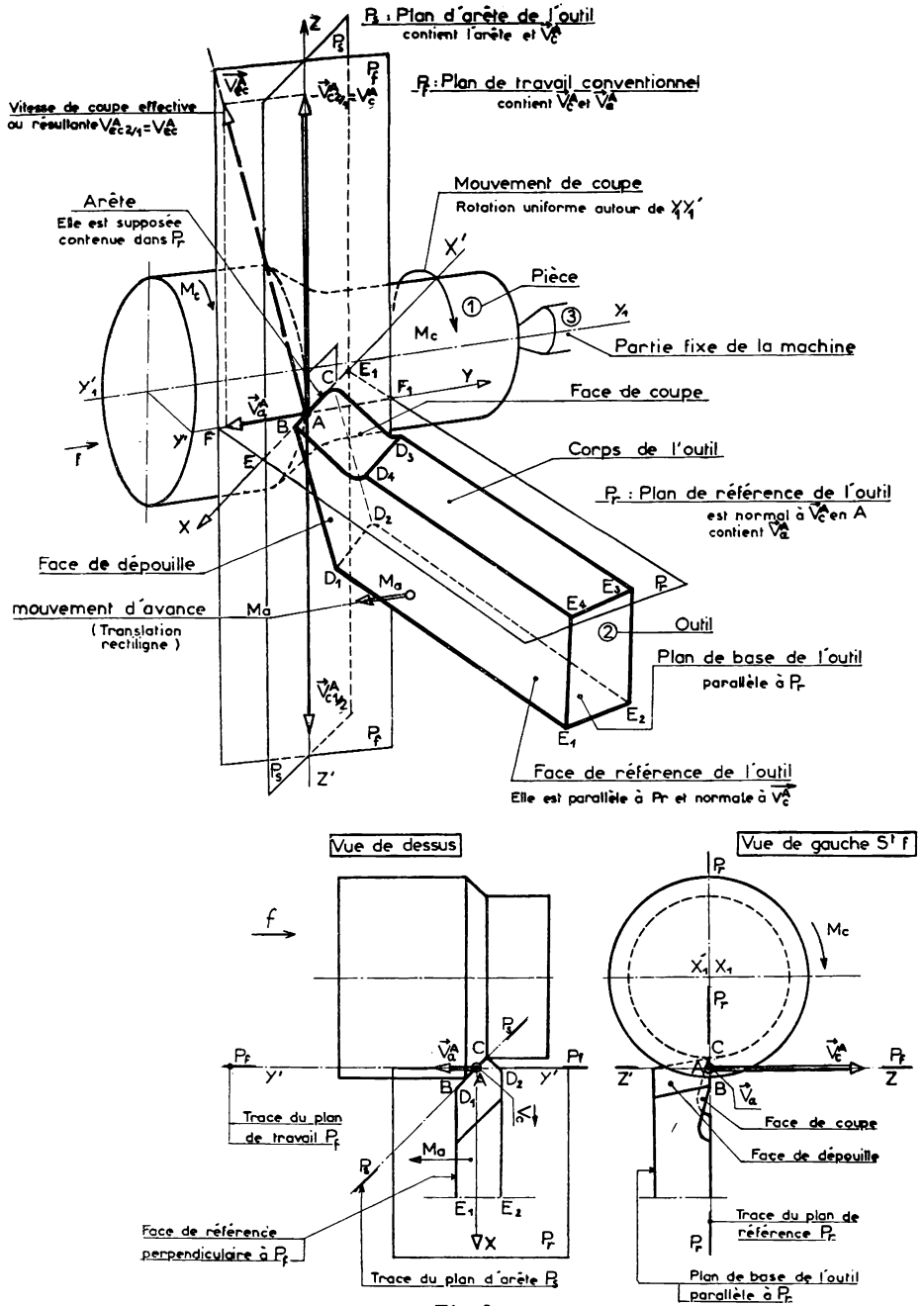

Ps : Plan d'arête de l'outil
contient l'arête et $\vec{V}_c^A$
Pf : Plan de travail conventionnel
contient $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_a^A$
Vitesse de coupe effective
ou résultante $\vec{V}_{c\,2/1}^A = \vec{V}_c^A$
Arête
Elle est supposée contenue dans Pr
Mouvement de coupe
Rotation uniforme autour de X1X'
Pièce
Partie fixe de la machine
Face de coupe
Corps de l'outil
Pr : Plan de référence de l'outil
est normal à $\vec{V}_c^A$ en A
contient $\vec{V}_a^A$
Face de dépouille
mouvement d'avance
(Translation rectiligne)
Outil
Plan de base de l'outil
parallèle à Pr
Face de référence de l'outil
Elle est parallèle à Pr et normale à $\vec{V}_c^A$
Vue de dessus
Vue de gauche S' f
Trace du plan de travail Pf
Face de référence perpendiculaire à Pf
Trace du plan d'arête Ps
Face de coupe
Face de dépouille
Trace du plan de référence Pr
Plan de base de l'outil parallèle à Pr

Fig. 6.

Étude de l'outil « en main »

I. — ANGLES CARACTÉRISTIQUES DE LA PARTIE ACTIVE DES OUTILS

Ils se définissent à partir des plans de l'outil. On distingue :
— les angles de l'arête,
— les angles des faces.
Les différents angles ont été désignés par des lettres grecques :

α *alpha*	$\varkappa$ *kappa*
β *bêta*	ψ *psi*
γ *gamma*	φ *phi*
λ *lambda*	

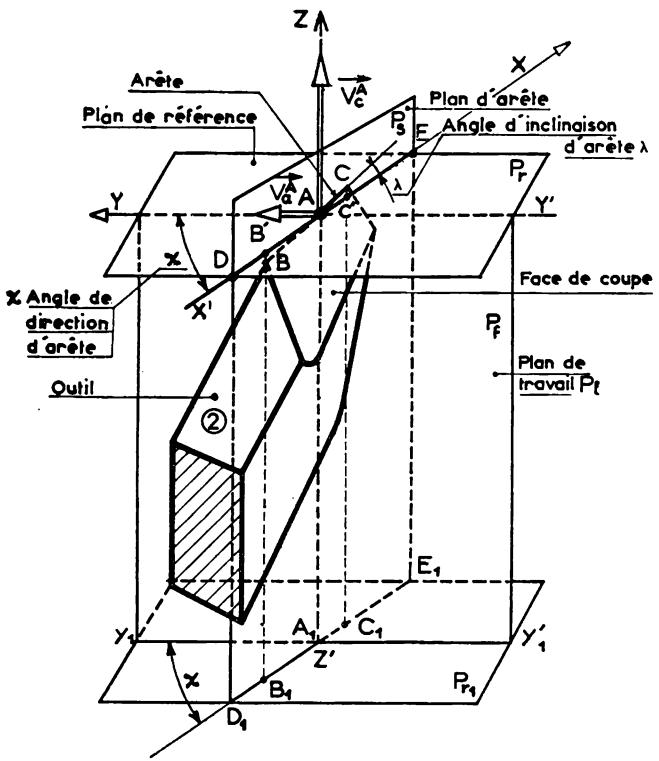


Fig. 7.

A. — Angles caractérisant la position de l'arête

1° ANGLE DE DIRECTION D'ARÊTE EN UN POINT A DE L'ARÊTE : angle $\varkappa$ (*kappa*).

Nous avons représenté en perspective, sur la *figure* 7, un outil à charioter prismatique dont l'arête de coupe est BC.

Pour un point A de l'arête de coupe, nous avons dessiné les vecteurs :

$\vec{V}_c^A$ vitesse du mouvement de coupe supposée (dans le cas du tour),

$\vec{V}_a^A$ vitesse du mouvement d'avance supposée.

Ces vecteurs — c'est le cas général — sont perpendiculaires.

Le **plan de référence** P_r est perpendiculaire à $\vec{V}_c^A$ et contient $\vec{V}_a^A$.

Le **plan de travail** P_f contient les vecteurs $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_a^A$. Il est perpendiculaire à P_r et leur droite d'intersection est YY', perpendiculaire à $\vec{V}_c^A$.

Le **plan d'arête** P_s contient le vecteur $\vec{V}_c^A$ et l'arête BC.

L'intersection du plan de travail P_f et du plan d'arête P_s est, de toute évidence, le support ZZ' de $\vec{V}_c^A$ puisque ces deux plans contiennent $\vec{V}_c^A$.

L'intersection du plan d'arête P_s et du plan de référence P_r est la droite DE. Le plan d'arête P_s est perpendiculaire au plan de référence P_r puisqu'il contient le vecteur $\vec{V}_c^A$ normal au plan de référence P_r.

La projection sur le plan P_r de l'arête BC est B'C' sur la droite d'intersection DE.

La mesure de l'angle dièdre des plans de travail P_f et d'arête P_s est l'angle $\widehat{AY, AD}$ tracé sur le plan de référence P_r.

On appelle **angle de direction d'arête de l'outil,** pour un point A de l'arête, l'angle aigu du dièdre formé par les plans de travail P_f et d'arête P_s.

Cet angle est l'angle que font les deux intersections des plans de travail et d'arête avec le plan de référence P_r : $\widehat{AY, AD}$.

Cet angle est désigné par la lettre grecque $\varkappa$ (*kappa*).

L'angle $\widehat{AY, AD}$ peut être considéré comme étant l'angle aigu que font dans le plan de référence P_r, au point A, le vecteur $\vec{V}_a^A$ et la projection sur ce plan de l'arête de l'outil si celle-ci est rectiligne (*fig.* 7) ou de la tangente à l'arête en A si celle-ci est curviligne.

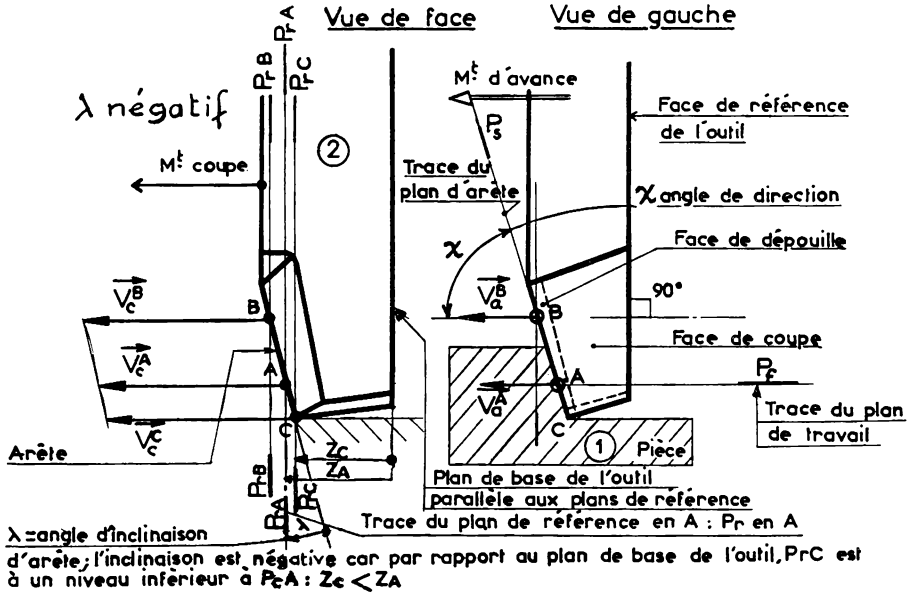

Vue de face
Vue de gauche
λ négatif
Mt coupe
Mt d'avance
Face de référence de l'outil
Trace du plan d'arête
χ angle de direction
Face de dépouille
90°
Face de coupe
Trace du plan de travail
Arête
Pièce
Plan de base de l'outil parallèle aux plans de référence
Trace du plan de référence en A : Pr en A
λ = angle d'inclinaison d'arête; l'inclinaison est négative car par rapport au plan de base de l'outil, PrC est à un niveau inférieur à PrA : Zc < ZA

Fig. 8.

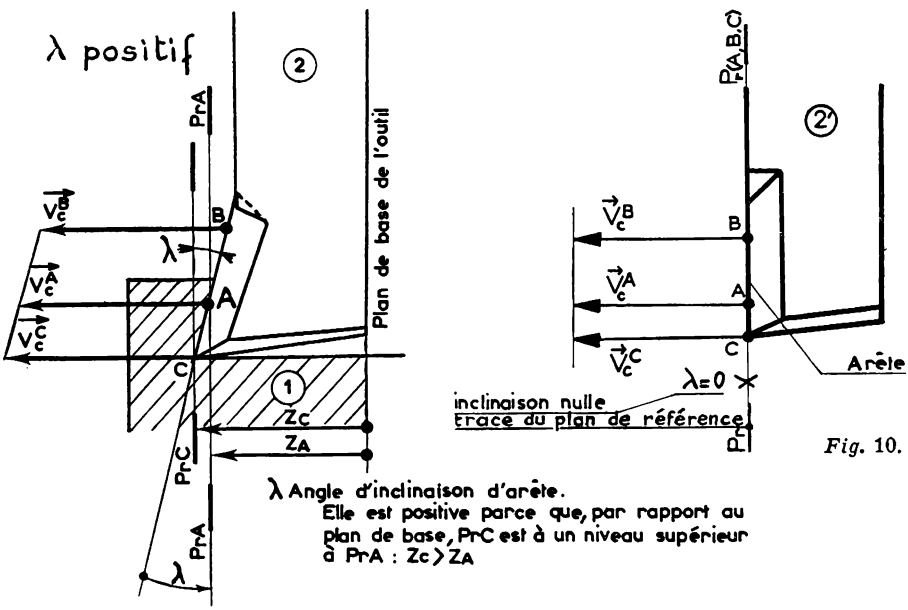

λ positif
Plan de base de l'outil
λ Angle d'inclinaison d'arête.
Elle est positive parce que, par rapport au plan de base, PrC est à un niveau supérieur à PrA : Zc > ZA
inclinaison nulle
trace du plan de référence
Arête
λ=0

Fig. 9.

Fig. 10.

2° ANGLE D'INCLINAISON D'ARÊTE EN UN POINT A DE L'ARÊTE : angle λ (*lambda*).

Examinons la *figure* 7 de l'outil à arête rectiligne.

On appelle **angle d'inclinaison d'arête de l'outil,** au point A, l'angle aigu de l'arête BAC avec sa projection B'AC' sur le plan de référence P_r au point A.

Si l'arête est curviligne, l'angle d'inclinaison d'arête est l'angle aigu que fait la tangente à l'arête en A avec sa projection sur le plan de référence P_r au point A.

Signe de l'inclinaison.

Supposons que le plan P_r (*fig.* 7) soit horizontal. L'arête de l'outil comporte deux parties AB et AC dont l'une, AC, est placée le plus près de la surface qui restera usinée.

Si AC est disposée, par rapport au plan de base de l'outil, à un niveau supérieur au plan de référence du point A (P_r de A), l'inclinaison λ est dite *positive* (*voir fig.* 9). Si AC est à un niveau inférieur au plan de référence P_rA, l'inclinaison λ est dite *négative* (*voir fig.* 8). Si le niveau est le même pour A et C, l'inclinaison est nulle (*fig.* 10).

EXEMPLES.

a) Le mouvement de coupe est une translation.

Sur les *figures* 8, 9, 10, on a représenté par ses projections un outil à charioter monté par exemple sur une raboteuse. Les vecteurs vitesse de coupe de tous les points de l'arête sont parallèles : $\vec{V}_c^A \,//\, \vec{V}_c^B \,//\, \vec{V}_c^C$.

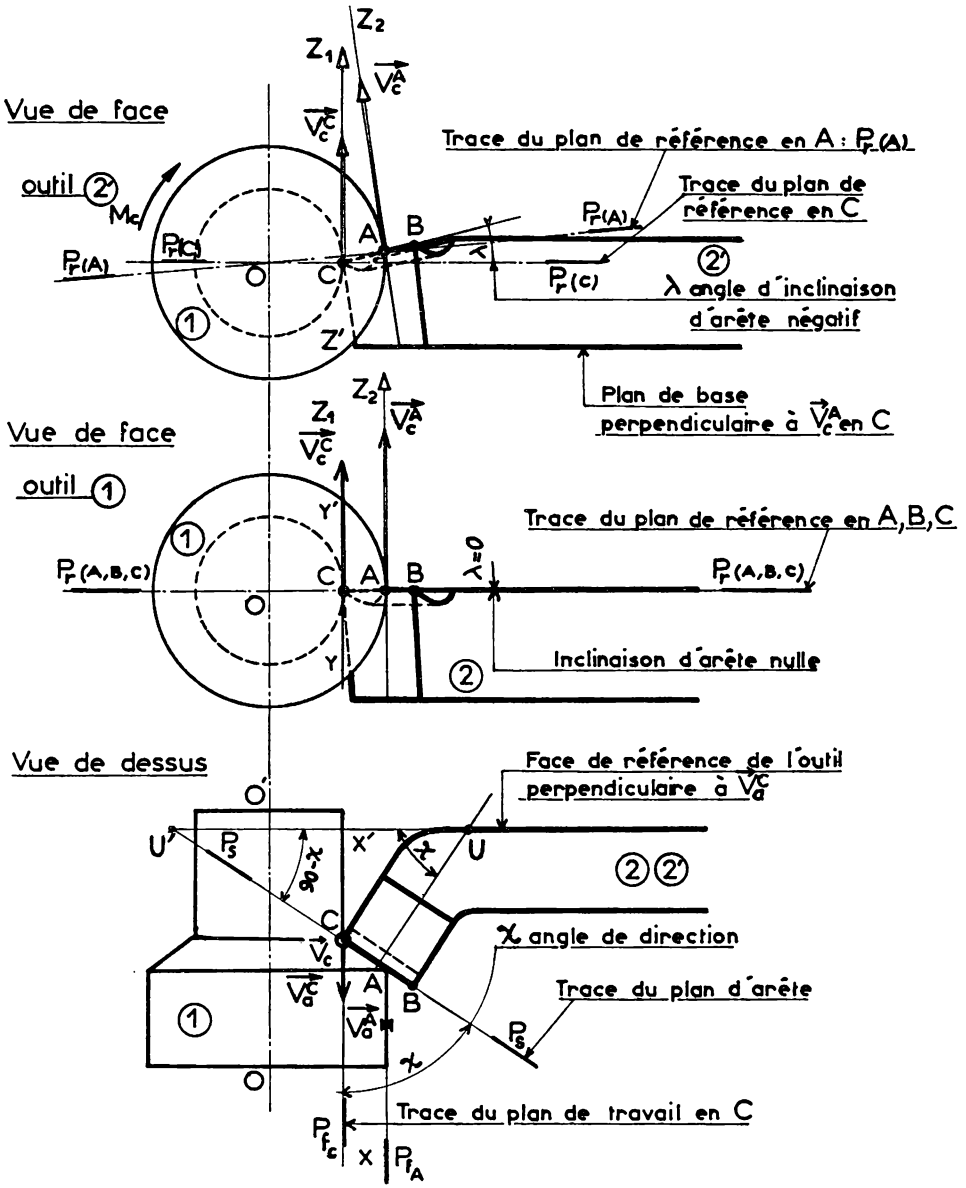

Vue de face
outil (2')
Trace du plan de référence en A : $P_{r(A)}$
Trace du plan de référence en C
$P_{r(A)}$
$P_{r(C)}$
λ angle d'inclinaison d'arête négatif
Plan de base perpendiculaire à $\vec{V}_c^A$ en C
Vue de face
outil (1)
Trace du plan de référence en A, B, C
$P_{r(A,B,C)}$
Inclinaison d'arête nulle
Vue de dessus
Face de référence de l'outil perpendiculaire à $\vec{V}_a^C$
χ angle de direction
Trace du plan d'arête
Trace du plan de travail en C
P_{f_C}
P_{f_A}

Fig. 11.

b) Le mouvement de coupe est une rotation.

La pièce est animée du mouvement de rotation : tournage.

La *figure* 11 représente deux outils coudés, l'un avec angle d'inclinaison d'arête négative et l'autre avec un angle d'inclinaison d'arête nulle. La vue de dessus est la même pour les deux outils.

Sur la vue de face de l'outil ②′, on remarque que les vecteurs vitesse de coupe en C, A et B : $\vec{V}_c^C$, $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_c^B$ n'ont pas même module et ne sont pas parallèles car ils sont perpendiculaires aux rayons *O*C, *O*A et *O*B qui ne se superposent pas.

Lorsqu'on usine, on dispose le plan de base de l'outil ②′ perpendiculaire au vecteur $\vec{V}_c^C$ au point C, point qui est le plus près de l'axe de rotation.

Sur la vue de face de l'outil ②, à inclinaison d'arête nulle on voit que les droites supports des vecteurs $\vec{V}_c^C$ et $\vec{V}_c^A$ sont parallèles mais n'ont pas le même module. Le plan de base de l'outil est perpendiculaire à cette direction commune et est évidemment parallèle au plan de référence de l'outil P_r, commun à tous les points de l'arête de coupe (C, A, B).

On notera, sur la vue de dessus, la position de la face de référence de l'outil qui est perpendiculaire au vecteur $\vec{V}_a^A$. Elle fait, avec le plan d'arête P_s, un angle $90° - \varkappa$. Si AU est la perpendiculaire en A à la projection CB de l'arête sur le plan de base et si UU′ est perpendiculaire à l'axe de la pièce *OO*′ donc à $\vec{V}_a^A$, on retrouve l'angle $\varkappa$, direction d'arête en $\widehat{AU, UU'}$. C'est la définition de l'angle de direction dans la norme précédente.

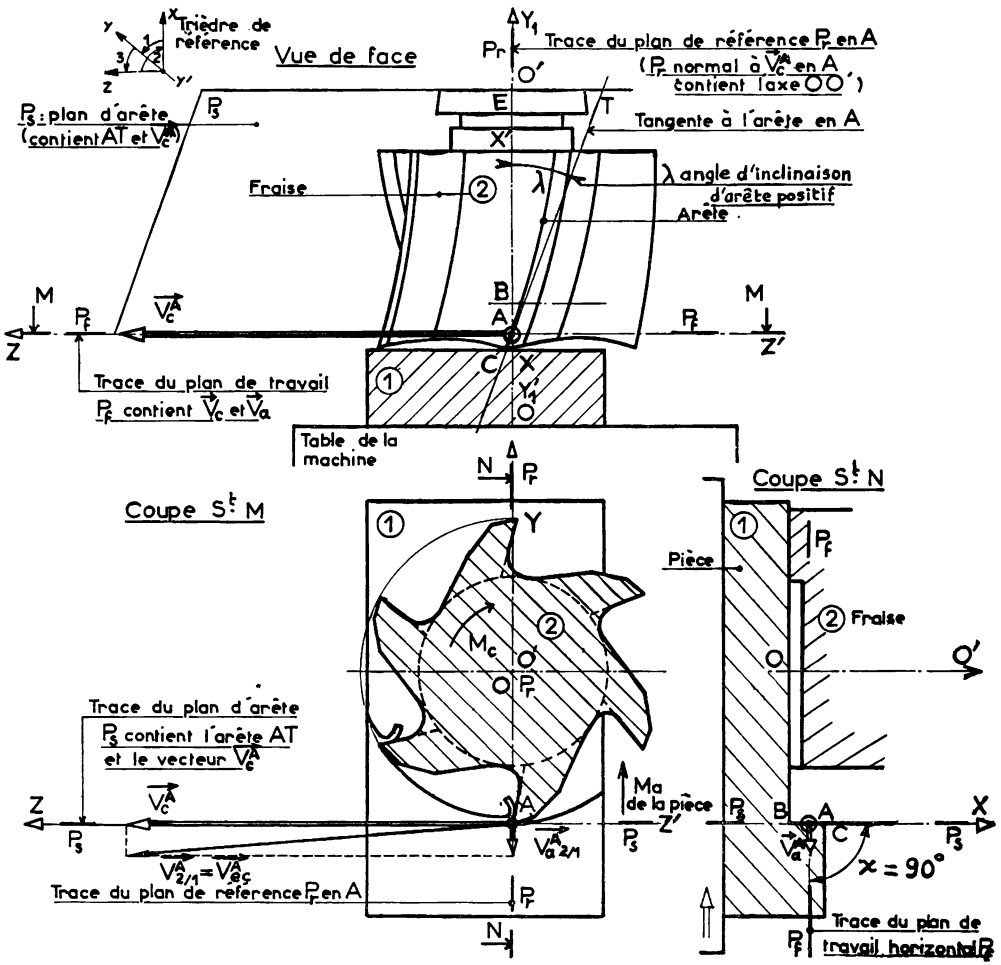

Trièdre de référence
Vue de face
Trace du plan de référence Pr en A
(Pr normal à Vc en A contient l'axe OO')
Ps : plan d'arête (contient AT et Vc)
Tangente à l'arête en A
Fraise
λ angle d'inclinaison d'arête positif
Arête
Trace du plan de travail
Pf contient Vc et Va
Table de la machine
Coupe S! M
Coupe S! N
Pièce
Fraise
Trace du plan d'arête
Ps contient l'arête AT et le vecteur Vc
Ma de la pièce
Trace du plan de référence Pr en A
x = 90°
Trace du plan de travail horizontal Pf

Fig. 12.

3° APPLICATION A L'OUTIL DE FRAISAGE : FRAISE DEUX TAILLES (fig. 12).

Le mouvement de coupe M_c communiqué à la fraise est une rotation uniforme autour de son axe OO'.

Le vecteur vitesse de coupe supposée $\vec{V}_c^A = \vec{V}_{c_{2/1}}^A$ est le vecteur vitesse du point A de la fraise ② par rapport à la pièce ① dont le mouvement d'avance est arrêté.

Le mouvement d'avance M_a communiqué à la pièce est une translation rectiligne suivant $X'X$.

Le vecteur vitesse d'avance supposée $\vec{V}_a^A = \vec{V}_{a_{2/1}}^A$ est le vecteur vitesse du point A de la fraise (dont le mouvement de coupe est arrêté) par rapport à la pièce.

— Le **plan de référence** P_r est le plan normal au vecteur $\vec{V}_c^A$ en A. Ce vecteur étant horizontal et tangent au cylindre enveloppe de la fraise, le plan de référence P_r contient l'axe OO' de la fraise. Le vecteur $\vec{V}_a^A$ est aussi situé dans ce plan.

— Le **plan de travail** P_f, défini par $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_a^A$, est horizontal et contient l'axe ZZ'.

— Le **plan d'arête** P_s, défini par le vecteur $\vec{V}_c^A$ et la tangente AT à l'arête, contient la droite verticale AX, intersection de P_r et P_s, qui est une génératrice du cylindre enveloppe de la fraise.

L'angle $\widehat{Y_1AT}$ est l'**angle** λ **d'inclinaison** de l'arête AT sur la droite AX (intersection de P_r et P_s).

L'inclinaison λ est positive.

L'**angle de direction** $\varkappa$ est l'angle que font les plans P_s et P_f. Il vaut 90°.

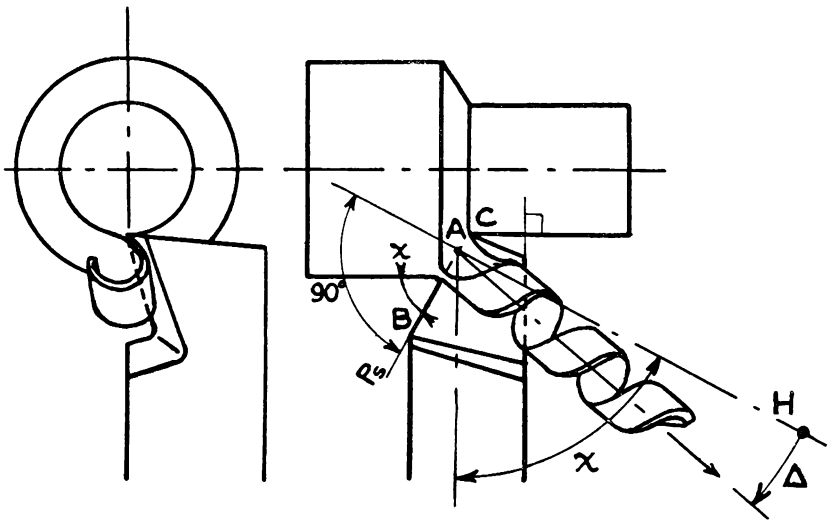


Fig. 13. — Influence de l'inclinaison d'arête sur le dégagement du copeau : inclinaison positive.

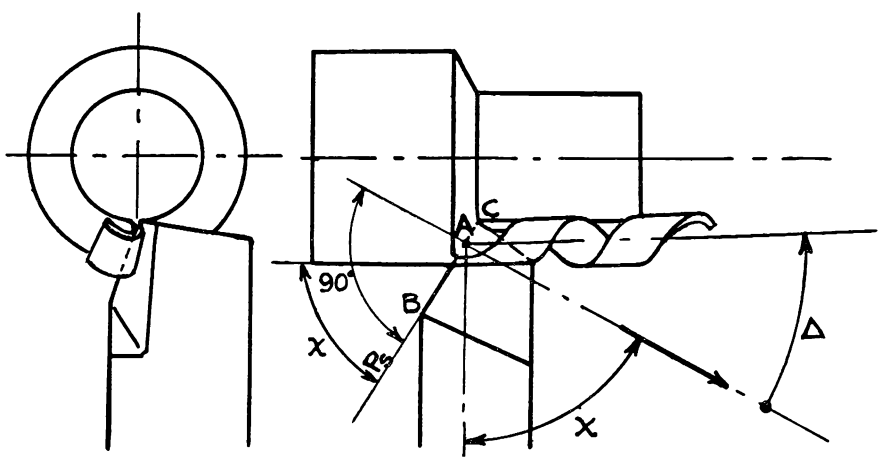


Fig. 14. — Influence de l'inclinaisonon d'arête sur le dégagement du copeau : inclinaison négative.

Intérêt des outils comportant une inclinaison d'arête.

L'inclinaison d'arête, combinée la direction d'arête, permet de contrôler la direction prise par le copeau.

Le copeau d'un outil à arête normale prend une direction généralement située dans un plan normal au profil.

Lorsque l'outil possède une inclinaison d'arête positive (*fig.* 13), le copeau se dégage dans un plan faisant, avec le plan normal au plan d'arête P_s, un angle $\widehat{\Delta}$ dirigé vers le corps de l'outil. Le copeau s'éloigne de la pièce.

Si l'outil comporte une inclinaison d'arête négative, le copeau se dégage dans un plan faisant, vers la pièce, un angle $\widehat{\Delta}$ avec le plan normal au plan d'arête P_s, comme le représente la *figure* 14. Dans ce cas, s'il s'agit d'une passe de finition, le copeau risque de rayer la pièce. Il importe donc de le fractionner à l'aide d'un brise-copeau.

Dans les deux cas, les angles $\widehat{\Delta}$ augmentent avec la valeur donnée à $\widehat{\lambda}$, angle d'inclinaison d'arête.

B. — Angles des faces des outils

GÉNÉRALITÉS

La partie active de l'outil est définie, pour chaque point de son arête tranchante, par des angles qui sont en principe obtenus en coupant l'outil par un plan.

Toute cette étude se rapportera à l'étude des angles limités aux plans caractéristiques précédemment définis pour « l'outil en main », à partir des vecteurs vitesse de coupe « supposée » et vitesse d'avance « supposée » $\vec{V}_{\hat{c}}$ et $\vec{V}_{\hat{a}}$.

L'étude qui va suivre sera relative à l'outil à tranchant unique rectiligne.

1. La *figure* 15 représente en perspective un outil de tournage ou de rabotage à gauche.

L'angle d'inclinaison de l'arête λ est négatif. P_s est le plan d'arête qui contient BC.

Le plan de référence P_r est normal au vecteur vitesse de coupe $\vec{V}_{\hat{a}}$. Pour rendre les figures plus faciles à lire, nous substituerons au plan de référence P_r un

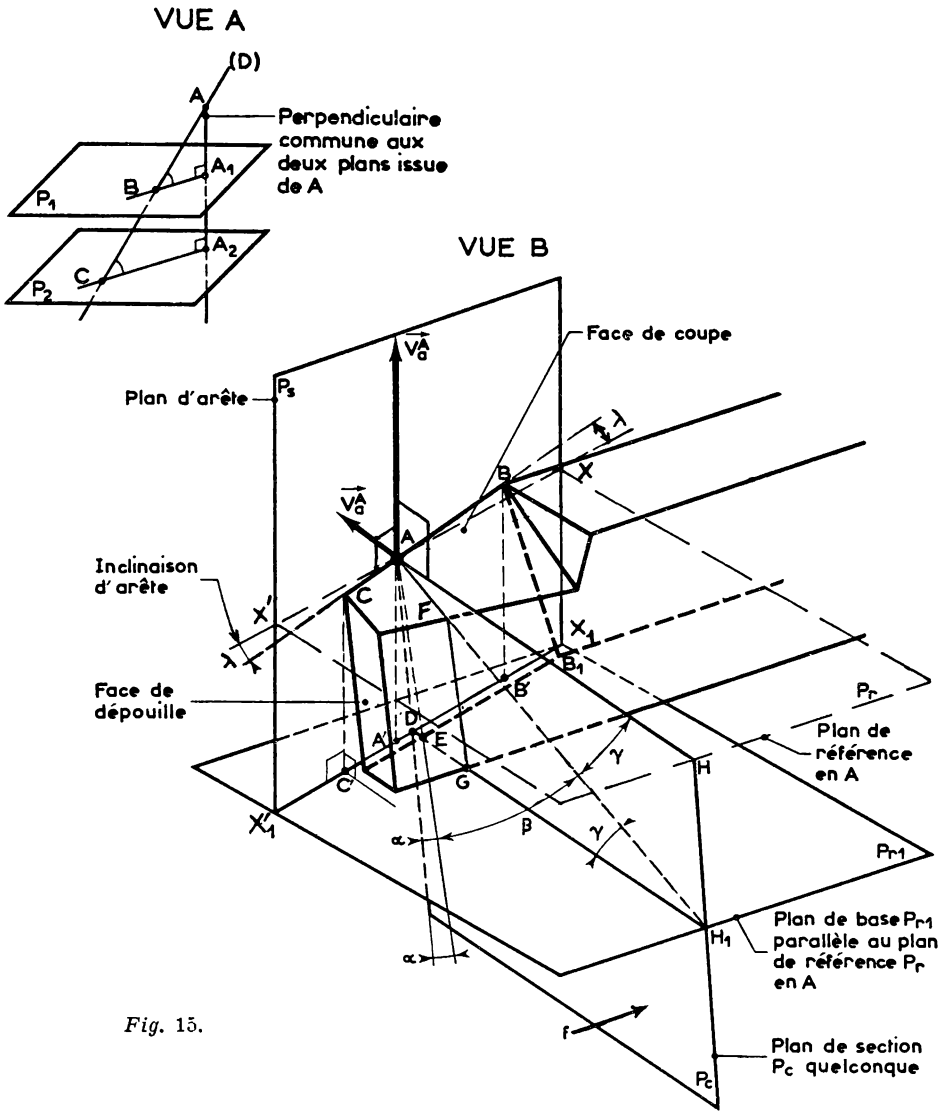


Fig. 15.

plan qui lui est parallèle : P_{r1}, que nous supposerons confondu avec le plan de base de l'outil. La *figure* 15 (vue A) montre que si deux plans P_1 et P_2 sont parallèles, l'angle d'une droite (D) avec le plan P_1 $(\widehat{ABA_1})$ est égal à l'angle que fait cette même droite avec le plan P_2 parallèle à P_1 $(\widehat{ACA_2})$.

2. Le plan de section P_c quelconque (vue B), passant par un point A de l'arête tranchante, coupe le plan de référence suivant AH, la face de coupe de l'outil suivant AF, la face de dépouille de l'outil suivant AE, le plan d'arête suivant AD :

a) L'angle (AH, AF) désigné par la lettre grecque γ (*gamma*), est l'**angle de coupe.**

b) L'angle (AF, AE), désigné par la lettre β (*bêta*), est l'**angle de taillant.**

c) L'angle (AE, AD), désigné par la lettre α (*alpha*), est l'**angle de dépouille.**

Ces trois lettres α, β, γ seront assorties d'une lettre minuscule en indice, afin de rappeler la position du plan de section.

3. Coupe positive et négative des outils.

Sur les *figures* 16 et 17, ces angles ont été représentés dans le cas :

— d'un outil à coupe positive :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90°;$$

— d'un outil à coupe négative :

$$\alpha + \beta + \gamma > 90° \qquad \text{avec} \qquad \alpha + \beta - \gamma = 90°,$$

α, β, γ étant la mesure arithmétique des angles.

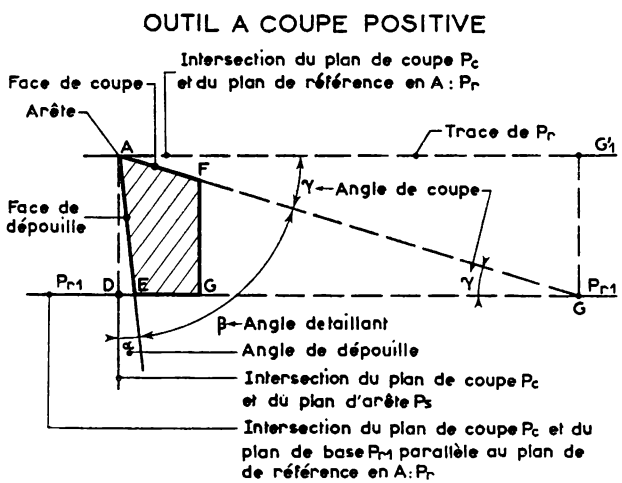

OUTIL A COUPE POSITIVE
Intersection du plan de coupe Pc et du plan de référence en A : Pr
Face de coupe
Arête
Trace de Pr
A
F
G'1
γ Angle de coupe
Face de dépouille
Pr1
D
E
G
γ
Pr1
G
β Angle de taillant
α Angle de dépouille
Intersection du plan de coupe Pc et du plan d'arête Ps
Intersection du plan de coupe Pc et du plan de base Pr1 parallèle au plan de de référence en A : Pr

Fig. 16.

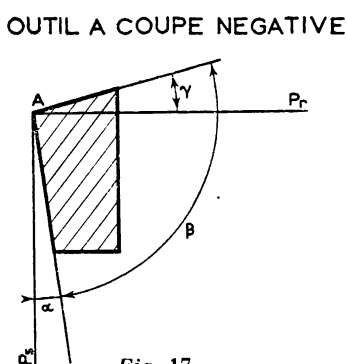


Fig. 17.

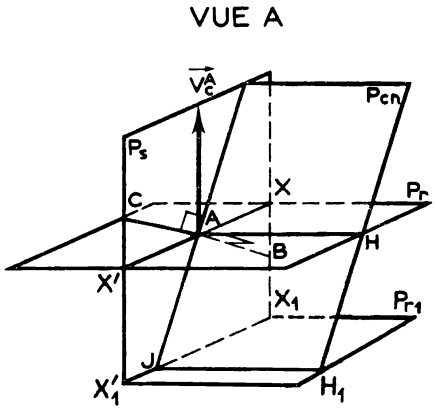
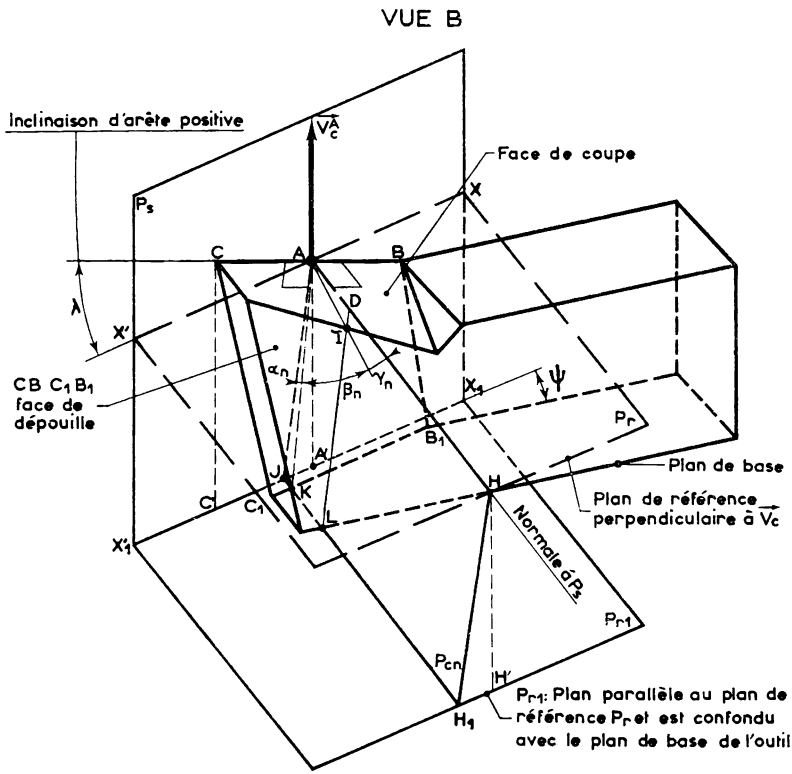


Fig. 18. — ANGLES NORMAUX

P_r est perpendiculaire à $\vec{V}_c^A$.
P_s contient l'arête BC et $\vec{V}_c^A$.
P_{cn} est perpendiculaire à BC, donc il est perpendiculaire à P_s et contient la normale à P_s : AH.



P_{cn} = plan de coupe perpendiculaire à l'arête BC en A.

II. — LES DIFFÉRENTS ANGLES NORMALISÉS

La disposition du plan de coupe permet de définir différents angles caractéristiques de la position des faces de l'outil.

A. — Définition des angles normaux

1. Le système de référence est celui de « l'outil en main ».

La *figure* 18 représente, en perspective, l'outil et ses plans caractéristiques :

a) Le plan d'arête P_s.

b) Le plan de référence P_r, normal en A au vecteur vitesse de coupe $\vec{V}_e$ et le plan parallèle P_{r_1} qui ici est confondu avec le plan de base de l'outil.

c) **Les angles normaux** sont définis au point A par l'intersection des plans P_s, P_r des faces de dépouille et de coupe avec un **plan de section P_{cn} qui est normal en A à l'arête tranchante BC.**

2. Les angles normaux de l'outil sont définis par l'intersection du plan P_{cn} avec :

— le plan P_s, droite AJ,

— la face de dépouille, droite AK,

— la face de coupe, droite AI,

— le plan P_r, droite AH.

Il est intéressant de remarquer que le plan P_{cn}, normal en A à l'arête BC, droite du plan P_s, est perpendiculaire au plan P_s.

L'intersection AH des plans P_r et P_{cn} est normale au plan P_s puisque ces deux plans sont normaux au plan P_s (sans être pour autant perpendiculaires entre eux). Cette remarque s'applique aussi à JH qui est normale au plan P_s.

L'arête BC étant normale au plan de coupe P_{cn}, il en résulte la perpendicularité de AH, AI, AK, AJ avec BC.

La projection de A sur l'intersection $X_1X'_1$ de P_s et P_{r_1} est A'.

Les angles normaux de la partie active sont :

a) Angle de dépouille normal $\alpha_n = \widehat{JAK}$.

b) Angle de taillant normal $\beta_n = \widehat{KAI}$.

c) Angle de coupe normal $\gamma_n = \widehat{IAH}$.

d) Angle d'inclinaison d'arête λ, ici positif ; λ = angle (BC, XX').

Sur la *figure* 19 apparaît nettement l'angle de direction d'arête. Cet angle $\varkappa$ est l'angle rentrant que fait, sur le plan de référence P_r ou P_{r1}, l'intersection de ce plan avec le plan d'arête P_s et le plan de travail P_f (qui contient $\vec{V}_{\hat{A}}$ et $\vec{V}_{\hat{e}}$). Cet angle apparaît en vraie grandeur sur la vue de dessus de l'outil.

Si l'on suppose que $\vec{V}_{\hat{A}}$ est normal aux arêtes de la queue prismatique de l'outil, le complément de $\varkappa$ apparaît aussi en vraie grandeur sur cette vue :

$$\psi = 90^\circ - \varkappa.$$

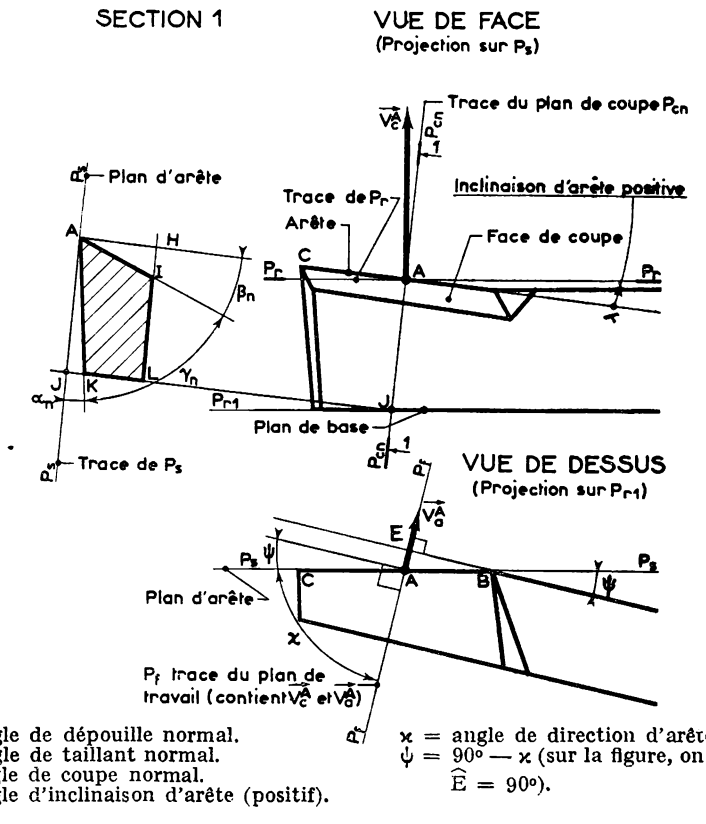


Fig. 19.

α_n = angle de dépouille normal.
β_n = angle de taillant normal.
γ_n = angle de coupe normal.
λ = angle d'inclinaison d'arête (positif).
$\varkappa$ = angle de direction d'arête.
$\psi = 90^\circ - \varkappa$ (sur la figure, on suppose que $\widehat{E} = 90^\circ$).

B. — Définition des angles orthogonaux

Le système de référence est toujours celui de « l'outil en main » (*fig.* 20) :

a) Plan d'arête P_s contenant l'arête tranchante BC de l'outil et le vecteur vitesse de coupe supposée $\vec{V}_{\hat{A}}$.

b) Le plan de référence P_r, pour un point A de l'arête, est le plan normal à $\vec{V}_c$. Les plans P_s et P_r sont donc normaux.

c) **Le plan de section P_{c0} est normal au plan P_s et au plan P_r,** ainsi qu'au plan P_{r1} qui lui est parallèle et qui contient la base de l'outil. Il en résulte la perpendicularité du plan de section à XX', intersection de P_s et P_r et à $X_1X'_1$, intersection de P_s et P_{r1}. Le plan P_{c0} contient $\vec{V}_c^A$.

On suppose que l'outil est installé sur la machine avec ses faces de référence normales au plan de travail, ce qui permet de situer l'angle ψ à la position indiquée sur la *figure* 20.

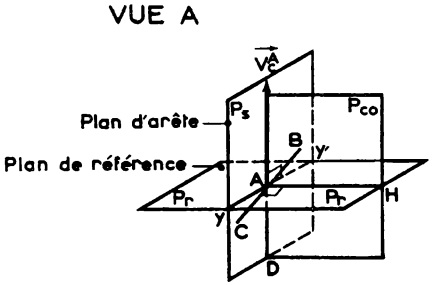
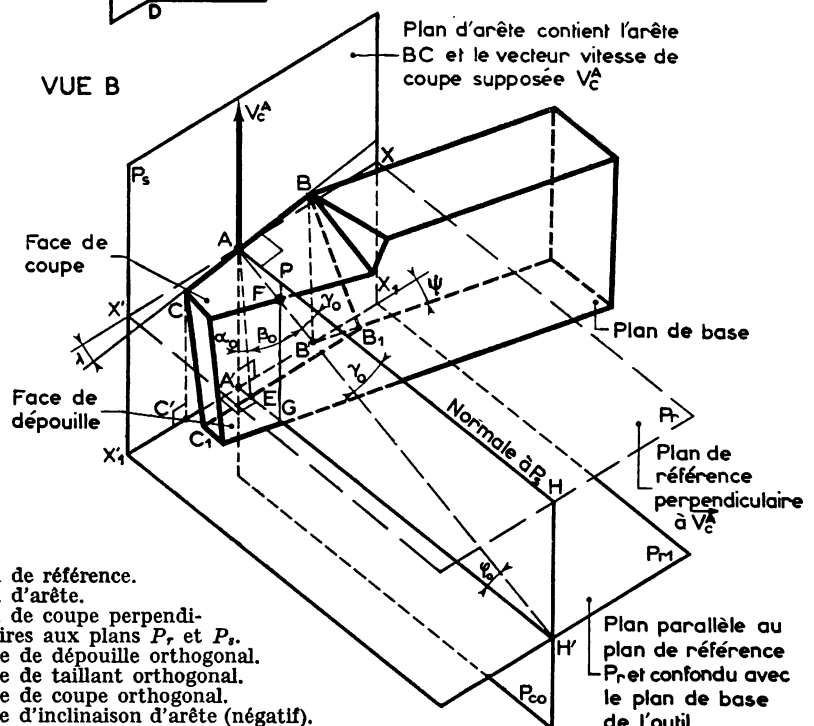


Fig. 20. — ANGLES ORTHOGONAUX.

P_r est perpendiculaire à $\vec{V}_c$.
P_s contient l'arête BC et $\vec{V}_c$.
P_{c0} est perpendiculaires à P_r et P_s.
Il l'est aussi YY' et contient la normale à P_s : AH.



P = plan de référence.
P_s = plan d'arête.
P_{c0} = plan de coupe perpendiculaires aux plans P_r et P_s.
α_0 = angle de dépouille orthogonal.
β_0 = angle de taillant orthogonal.
γ_0 = angle de coupe orthogonal.
λ = angle d'inclinaison d'arête (négatif).
$\varkappa$ = angle de direction d'arête.
ψ = $90° - \varkappa$.

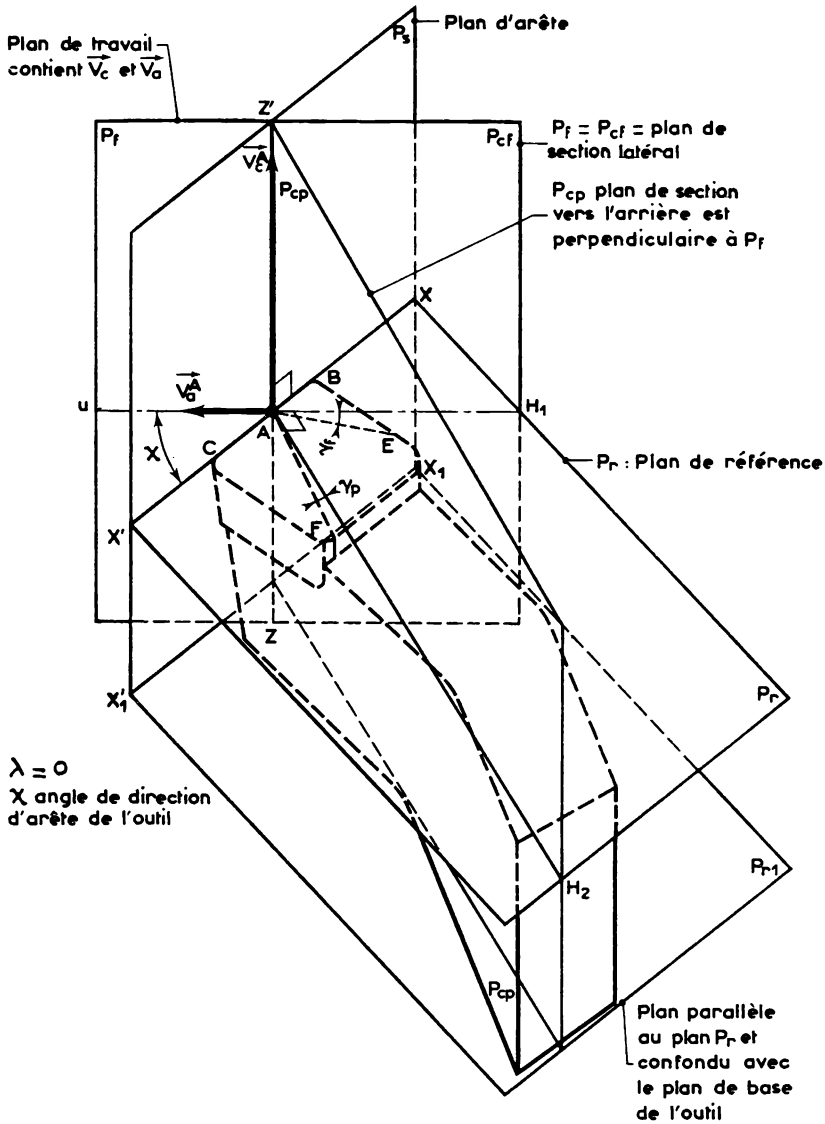


Fig. 21. — ANGLES LATÉRAUX ET VERS L'ARRIÈRE

C. — Définition des angles latéraux et vers l'arrière

Les plans de section sont représentés sur la *figure* 21.

a) Le plan de section latéral en A est le plan de travail conventionnel P_f (il contient les vecteurs $\vec{V}_a^A$ et $\vec{V}_c^A$. Nous l'avons aussi appelé P_{cf} pour respecter la convention prise pour désigner les plans de section.

b) Le plan de section vers l'arrière en A est le plan P_{cp} qui est perpendiculaire à la fois au plan de section latéral et au plan de référence, ou encore au plan de travail P_f et au plan de référence P_r.

D. — Angles directs d'affûtage

Le **taillant,** partie essentielle de l'outil, est limité par deux surfaces en principe usinées : la face de dépouille, la face de coupe.

La position de l'outil par rapport à la pièce est définie à partir d'un référentiel qui comprend :

— le plan d'arête P_s contenant le vecteur vitesse de coupe supposée $\vec{V}_c^A$ (au point A considéré) et l'arête de l'outil (ou la tangente à l'arête en A, *voir fig.* 22) ;

— le plan de référence P_r qui est perpendiculaire à $\vec{V}_c^A$;

— le plan de travail P_f contenant $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_a^A$ (non représenté *fig.* 22).

Ce référentiel est utilisé pour l'usinage ou l'affûtage des faces de coupe et de dépouille. Pour situer facilement ces surfaces dans le plan de l'outil, nous verrons qu'il est intéressant de définir l'**angle de coupe** et l'**angle de dépouille** à partir de **la droite de plus grande pente de ces faces** avec le plan de **référence** P_r ou le plan parallèle P_{r_1}.

Ces deux angles sont appelés ***angle de dépouille direct d'affûtage*** α_a et ***angle de coupe direct d'affûtage*** γ_c.

Il ne saurait être question d'angle de taillant direct d'affûtage.

1. ANGLE DE DÉPOUILLE DIRECT D'AFFUTAGE : α_a.

La *figure* 22 représente un outil à inclinaison de l'arête λ positive.

> *L'angle de dépouille direct d'affûtage α_a est l'angle aigu que fait, avec une perpendiculaire au plan de référence P_r issue du point A considéré, la ligne de plus grande pente par rapport à ce plan, de la face de dépouille.*

AA' est la perpendiculaire à P_r et à P_{r1}, AE' est la droite de plus grande pente : $\alpha_a = \widehat{E'AA'}$.

Il est intéressant de remarquer que, par définition, AE' est perpendiculaire sur $E'X_2$, droite d'intersection de la face de dépouille et du plan de référence P_{r1}. AA' est perpendiculaire en A' à la droite $A'X_1$, intersection du plan d'arête P_s avec P_{r1}.

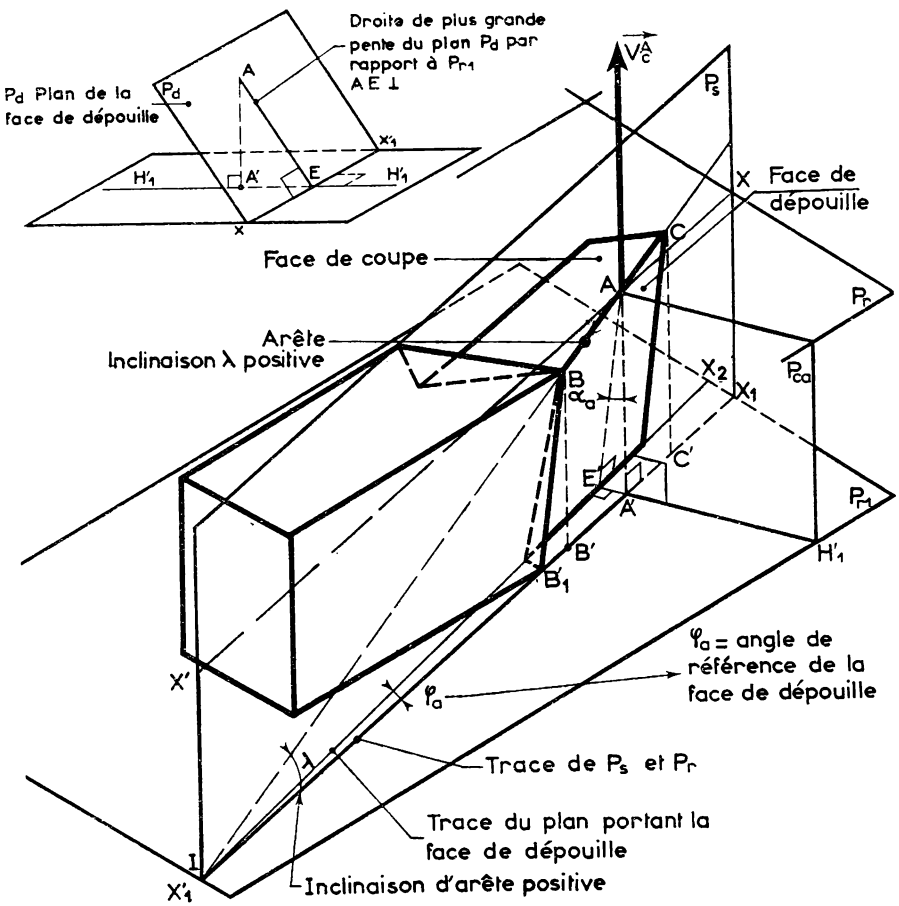


Fig. 22. — Angle de dépouille direct d'affûtage.

Si l'on joint les points A′ et E′, la droite A′E′ est perpendiculaire sur E′X_2 (application du théorème des trois perpendiculaires).

2. ANGLE DE RÉFÉRENCE DE LA FACE DE DÉPOUILLE : φ_a.

Cet angle φ_a est défini sur le plan de référence P_{r_1} : il est l'angle aigu compris entre les traces du plan portant la face de dépouille : E′X_2 et du plan d'arête P_s : A′X_1. L'intersection de E′X_2 et A′X_1 est en X_1'.

Lorsque le point X_1' se trouve en arrière de la partie active de l'outil, on donne à l'angle φ_a le signe **positif**, le même que celui de l'angle λ d'inclinaison d'arête. Si le point X_1' est disposé en avant de la partie active (hors de la projection de l'outil sur le plan P_{r_1}), le signe de λ et de φ_a est **négatif.**

La *figure* 23 représente, en projection orthogonale, les angles relatifs à la face de dépouille : α_a et φ_a (cas où φ_a est positif).

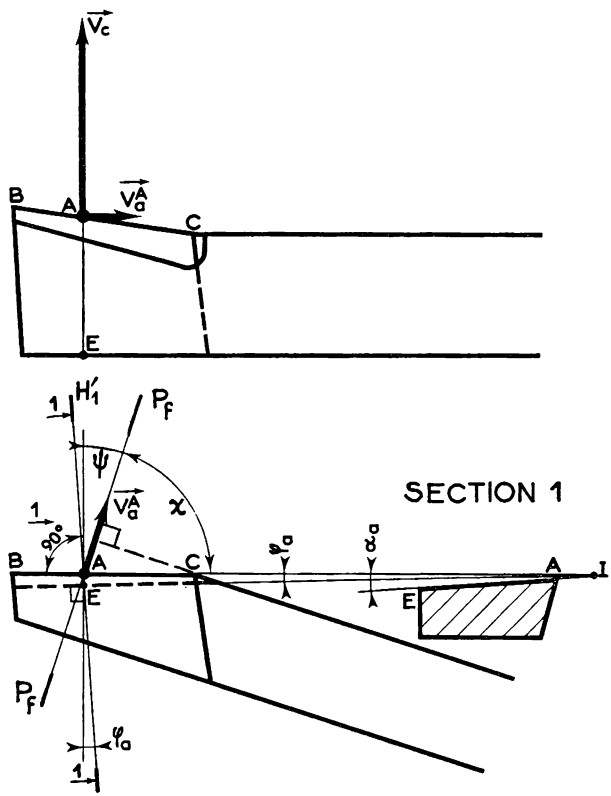


Fig. 23.

α_a = angle de dépouille d'affutage.
λ = angle d'inclinaison d'arête (négatif).
χ = angle de direction d'arête.
ψ = 90° — χ.
φ_a = angle de référence de la face de dépouille.

3. ANGLE DE COUPE DIRECT D'AFFÛTAGE : γ_c.

Cet angle, représenté sur la *figure* 24, est relatif au point A de l'arête d'un outil identique au précédent (inclinaison d'arête λ positive).

AM est la droite de plus grande pente de la face de coupe qui coupe, en P, le plan P_{r1}, parallèle au plan de référence P_r.

A′ est la projection de A sur le plan P_{r1}. De même AA'_1 est la projection sur le plan P_r de la droite de plus grande pente AP.

L'angle de coupe direct d'affûtage est l'angle aigu que fait, avec le plan de référence P_r *(ou* P_{r1}*) la ligne de plus grande pente AP de la face de coupe.*

$$\widehat{PAA'_1} = \widehat{APA'} = \gamma_c.$$

Examinons la figure plus en détail.

L'intersection de l'arête BC avec le plan P_{r1} est le point Z_1. Les droites BC et AP appartiennent à la face de coupe supposée plane ; l'intersection de cette face avec le plan P_{r1} est la droite Z_1P. La droite DM coupe le plan P_{r1} en Z_2 sur PZ_1.

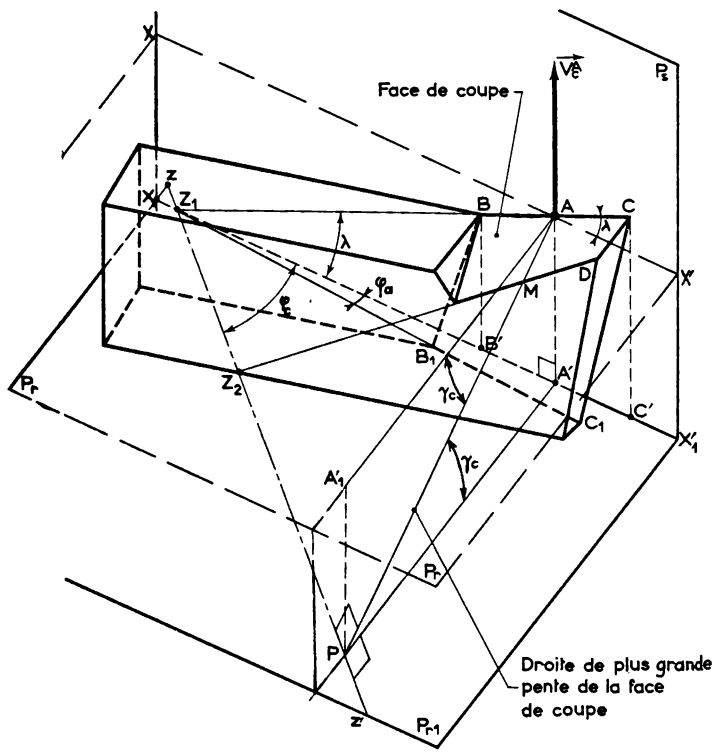


Fig. 24. — Angle de coupe direct d'affûtage.

Puisque AP est la droite de plus grande pente de la face de coupe BCM avec le plan P_{r1}, le plan A'AP est perpendiculaire à Z_1P.

L'angle γ_c est l'angle du dièdre constitué par le plan P_{r1} et la face BCM. Les droites AP et A'P sont toutes deux perpendiculaires à Z_1P.

4. ANGLE DE RÉFÉRENCE DE LA FACE DE COUPE : φ_c.

Il est tracé sur le plan de référence P_r (ou P_{r1}). Pour faciliter la lecture du dessin, nous avons choisi le plan P_{r1} (*fig.* 24).

L'angle de référence de la face de coupe φ_c est l'angle aigu que font, sur P_{r1}, les traces du plan d'arête P_s et de la face de coupe.

L'intersection de P_s avec P_{r1} est X_1X_1' ; l'intersection de la face BCM avec P_{r1} est ZZ', donc :

$$\text{angle } (X_1X_1', ZZ') = \widehat{C'Z_1P} = \varphi_c.$$

Sur la *figure* 25 représentant le dessin géométrique de l'outil, on retrouve les angles γ_c et φ_c.

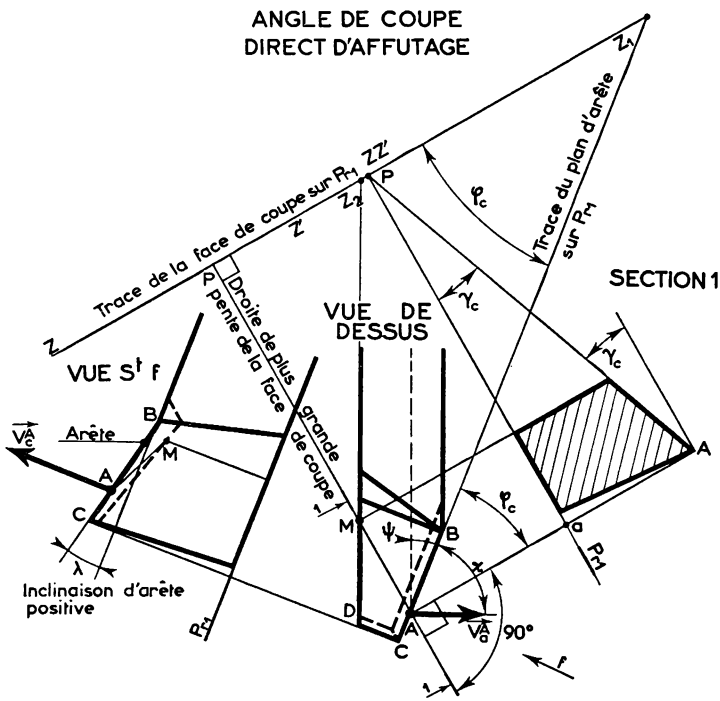


Fig. 25. φ_c = angle de référence de la face de coupe.
γ_c = angle de coupe direct d'affûtage.
$\varkappa$ = angle de direction d'arête.
$\psi = 90° - \varkappa$.

Relations entre les angles caractéristiques de la partie active des outils

Nous supposerons, pour une première étude, que les faces de coupe et de dépouille sont des surfaces planes. De ce fait, l'arête est une droite. L'usinage et l'affûtage de l'outil nécessitent que la face de coupe et la face de dépouille soient définies par deux droites :

— l'arête et la droite de plus grande pente par rapport au plan de référence ;

— ou l'arête et la droite d'intersection de ces faces par le plan normal à l'arête en un point.

Il faut donc connaître :

λ, angle d'inclinaison d'arête,
α_a et γ_c, angles directs d'affûtage,
α_n et γ_n, angles normaux.

Mais, comme l'outil peut être défini par les angles orthogonaux, latéraux ou vers l'arrière, il est intéressant de chercher les relations qui lient la valeur de ces angles avec les angles directs d'affûtage et les angles normaux.

I. — DÉTERMINATION DES RELATIONS ENTRE LES ANGLES DIRECTS D'AFFÛTAGE ET LES ANGLES ORTHOGONAUX

Un outil ayant été défini par l'inclinaison d'arête λ, l'angle de référence de la face de coupe φ_c, l'angle de référence de la face de dépouille φ_a et les angles orthogonaux α_0, β_0, γ_0, il est intéressant, pour permettre l'affûtage ou l'usinage des faces de coupe et de dépouille, de calculer :

φ_c connaissant λ et γ_c,
φ_c en fonction de λ et γ_0,
γ_0 en fonction de γ_c,

et, en ce qui concerne la face de dépouille :

φ_a en fonction de λ et α_0,
α_0 en fonction de α_a.

La recherche des relations est un intéressant problème de géométrie que peuvent aborder les élèves mais qui sort des préoccupations de cet ouvrage.
Nous en donnons simplement les résultats.

A. — Relations intéressant la face de coupe

(1) $\boxed{\operatorname{tg} \gamma_0 = \operatorname{tg} \gamma_c \cos \varphi_c \text{ ou } \cot \gamma_c = \cot \gamma_0 \cdot \cos \varphi_c}$ (1)

(2) $\boxed{\operatorname{tg} \varphi_c = \dfrac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg} \gamma_0} = \operatorname{tg} \lambda \cdot \cot \gamma_0}$ (2)

Les relations (1) et (2) permettent de calculer γ_c (angle de coupe direct d'affûtage) et φ_c (angle de référence de la face de coupe), connaissant λ (angle d'inclinaison d'arête) et γ_0 (angle de coupe orthogonal).

B. — Relations intéressant la face de dépouille

a) **Relation entre α_a, φ_a et λ :**

$$\boxed{\sin \varphi_a = \operatorname{tg} \alpha_a \cdot \operatorname{tg} \lambda} \quad (3)$$

b) **Relation entre α_0 et α_a :**

$$\boxed{\operatorname{tg} \alpha_a = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \cos \varphi_a} \quad (4)$$

et

$$\boxed{\cot \alpha_0 = \cot \alpha_a \cdot \cos \varphi_a} \quad (4')$$

c) **Relation entre α_0 et φ_a :**

$$\boxed{\operatorname{tg} \varphi_a = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \operatorname{tg} \lambda} \quad (5)$$

APPLICATION NUMÉRIQUE.

Un outil de coupe est défini par les angles orthogonaux $\gamma_0 = 20°$, $\alpha_0 = 6°$ *et l'inclinaison d'arête négative* $\lambda = 15°$. *Calculer les angles directs d'affûtage* γ_c *et* α_a, *ainsi que les angles de référence* φ_c *et* φ_n.

Solution :

Il suffit d'appliquer les relations précédentes.

1° Angles de coupe :

a) $\operatorname{tg} \varphi_c = \operatorname{tg} \lambda \cdot \cot \gamma_0 = \operatorname{tg} 15° \cdot \cot 20° = 0{,}267 \times 2{,}747$
$\operatorname{tg} \varphi_c = 0{,}733$, d'où $\varphi_c =$ **36,3 degrés.**

b) $\cot \gamma_c = \cot \gamma_0 \cdot \cos \varphi_c = \cot 20° \cdot \cos 36°{,}3 = 2{,}747 \times 0{,}805$
$\cot \gamma_c = 2{,}198$, d'où $\gamma_c =$ **24,5 degrés.**

2° Angles de dépouille :

a) $\operatorname{tg} \varphi_a = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} 6° \cdot \operatorname{tg} 15° = 0{,}105 \times 0{,}267$
$\operatorname{tg} \varphi_a = 0{,}028$, d'où $\varphi_a =$ **1,6 degré.**

b) $\operatorname{tg} \alpha_a = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \cos \varphi_a = \operatorname{tg} 6° \cdot \cos 1°{,}6 = 0{,}105 \times 0{,}999$
$\operatorname{tg} \alpha_a = 0{,}104$, d'où $\alpha_a =$ **6 degrés.**

II. — RELATION ENTRE LES ANGLES ORTHOGONAUX ET LES ANGLES NORMAUX

Les relations entre les angles normaux : α_n, γ_n et les angles orthogonaux α_0, γ_0 sont les suivantes :

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_0 \cdot \cos \lambda \qquad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \frac{1}{\cos \lambda} \qquad (2)$$

$$\cos \lambda = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \cot \alpha_n = \cot \gamma_0 \cdot \operatorname{tg} \gamma_n \qquad (3)$$

APPLICATION.

Les angles orthogonaux d'un outil sont $\alpha_0 = 6°$ *et* $\gamma_0 = 20°$. *L'angle* $\lambda = 30°$. *Calculer* α_n, γ_n *et* β_n.

Solution :

Nous aurons besoin des valeurs suivantes :

$\cos \lambda = \cos 30° = \dfrac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866$; $\operatorname{tg} \alpha_0 = \operatorname{tg} 6° = 0{,}105$;

$\operatorname{tg} \gamma_0 = \operatorname{tg} 20° = 0{,}364$.

a) Calcul de γ_n : $\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_0 \cdot \cos \lambda$

$= 0{,}364 \times 0{,}866 = 0{,}315$

d'où $\gamma_n =$ **17,5 degrés.**

b) Calcul de α_n : $\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \dfrac{1}{\cos \lambda}$

$= 0{,}105 \times \dfrac{1}{0{,}866} = 0{,}12$

d'où $\alpha_n =$ **6,9 degrés.**

c) Calcul de β_n :

On sait que : $\alpha_n + \beta_n + \gamma_n = 90°$, d'où :

$\beta_n = 90° - (17{,}5 + 6{,}9) =$ **65,6 degrés.**

III. — RELATION ENTRE LES ANGLES LATÉRAUX ET VERS L'ARRIÈRE ET LES ANGLES DIRECTS D'AFFÛTAGE

Angles de coupe latéraux et angles directs d'affûtage :

$$\begin{cases} \cot \alpha_f = \cot \alpha_a \cdot \sin (\chi - \varphi_a) & (1) \\ \operatorname{tg} \gamma_f = \operatorname{tg} \gamma_c \cdot \sin (\chi - \varphi_c) & (2) \end{cases}$$

Angles de coupe vers l'arrière et angles directs d'affûtage :

$$\begin{cases} \cot \alpha_p = \cot \alpha_a \cdot \cos (\chi - \varphi_a) & (1) \\ \operatorname{tg} \gamma_p = \operatorname{tg} \gamma_c \cdot \cos (\chi - \varphi_c) & (2) \end{cases}$$

IV. — RÉSUMÉ

Pour faciliter l'usage de toutes ces relations, nous avons fait un tableau de celles qui sont le plus souvent utilisées :

$$\operatorname{tg} \gamma_0 = \operatorname{tg} \gamma_c \cdot \cos \varphi_c \text{ ou } \cot \gamma_c = \cot \gamma_0 \cdot \cos \varphi_c \quad (1)$$

$$\sin \varphi_c = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg} \gamma_c} = \operatorname{tg} \lambda \cdot \cot \gamma_c \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\operatorname{tg} \gamma_0} = \operatorname{tg} \lambda \cdot \cot \gamma_0 \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_a = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \cos \varphi_a \quad (4)$$

$$\sin \varphi_a = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \operatorname{tg} \lambda \quad (5)$$

Fabrication des outils

GÉNÉRALITÉS

Pour réaliser un outil supposé prismatique, il faut :

1° Usiner le prisme capable ;

2° Usiner la face de coupe ;

3° Usiner la face de dépouille ;

4° Procéder aux traitements thermiques de la partie active lorsqu'il s'agit d'outils monoblocs et affûter les faces de coupe et de dépouille.

Lorsqu'il s'agit d'outils à plaquettes rapportées, les surfaces de références sur lesquelles chaque plaquette est disposée doivent être usinées avec le même soin que les faces de coupe et de dépouille de l'outil monobloc.

A. — Organisation de l'usinage ou de l'affûtage des faces de coupe et de dépouille (voir fig. 26)

La connaissance de la géométrie des outils est indispensable. Il y a lieu de situer l'outil par rapport à la pièce et de définir la position des vecteurs $\vec{V}_e$ et $\vec{V}_a$ pour un point de l'arête. Ainsi sont définis les plans de travail P_f et le plan de référence P_r de l'outil.

Si on convient de donner à l'outil un angle $\widehat{\varkappa}$ de direction d'arête, on peut mettre en place le plan d'arête P_s. L'angle λ d'inclinaison d'arête est nécessaire pour l'usinage des faces de coupe et de dépouille en ébauche. Les angles de direction d'arête $\widehat{\lambda}$, $\widehat{\alpha_a}$ de dépouille direct d'affûtage et $\widehat{\gamma_c}$ de coupe direct d'affûtage sont indispensables pour assurer l'usinage et l'affûtage des faces de dépouille et de coupe.

B. — Problème de l'usinage ou de l'affûtage de la face de coupe

Lorsqu'on veut usiner ou affûter une face plane de dépouille ou de coupe, il faut la faire coïncider avec le plan de travail d'une fraise ou d'une meule. Ce plan de travail sur les machines à usiner est généralement vertical ou horizontal.

Deux rotations autour de deux axes rectangulaires sont indispensables pour assurer cette coïncidence : axes XX' et YY' (*fig.* 26, face de coupe). Si P_r est le

plan de référence de l'outil, l'**axe de rotation** XX' parallèle à $\vec{V}_c^A$ est aussi perpendiculaire à P_r et à P_{r_1} et parallèle au plan d'arête P_s.

Le second **axe de rotation** YY' est parallèle au plan de travail de l'outil (meule ou fraise) que nous supposerons d'abord horizontal.

On dispose généralement, sur la machine, le corps de l'outil avec la face de référence KK'DD' perpendiculaire au plan de travail P_f. Soient AP la droite de plus grande pente de la face de coupe, BAC l'arête de l'outil, B'A'C' la projection de l'arête sur P_{r_1}, A'P la projection de la droite de plus grande pente AP et supposons que l'axe X'X passe par un point O de la droite A'P.

L'angle $\widehat{N'A'B'}$ est égal à $\varkappa$, angle de direction d'arête, parce qu'il est l'angle dièdre de P_f et P_s. On retrouve en $\widehat{K'M'P}$ l'angle $\varkappa$ parce que $Y_1'N'A'$ est perpendiculaire à J'N' et par suite à K'M' et que PM'A' est perpendiculaire à A'B'.

Première rotation autour de XX' : Si, dans le plan P_{r_1}, on fait tourner l'outil autour de XX' (rotation r_1) d'un angle $\varkappa$, il prend la position 2 et le plan d'arête P_{s_2} devient parallèle à l'axe YY'.

Deuxième rotation autour de YY' : Si on fait tourner le plan P_{r_1} et l'outil autour de YY' d'un angle γ_c (angle de coupe direct d'affûtage), la face de coupe est disposée dans un plan horizontal P_{r_1} (rotation r_2). On peut l'amener dans le plan de travail de l'outil supposé horizontal, par translations verticales ou horizontales, comme on le verra au cours de l'étude des machines à affûter. Une

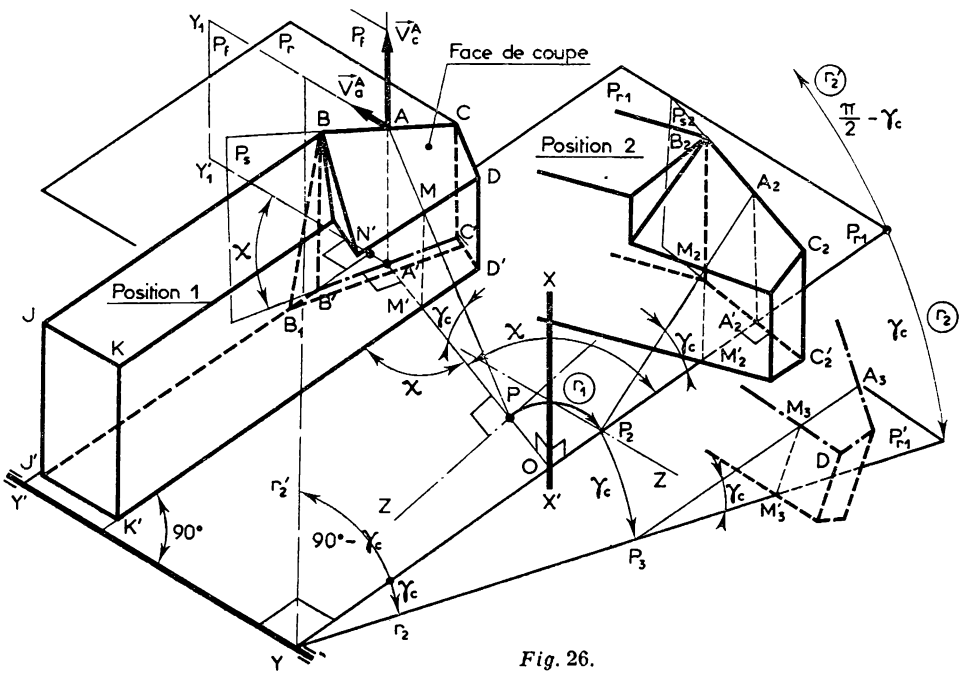


Fig. 26.

rotation r'_2 autour de YY', d'un angle $\frac{\pi}{2} - \gamma_c$, amène la face de coupe dans un plan vertical.

C. — Problème de l'usinage ou de l'affûtage de la face de dépouille (voir fig. 27)

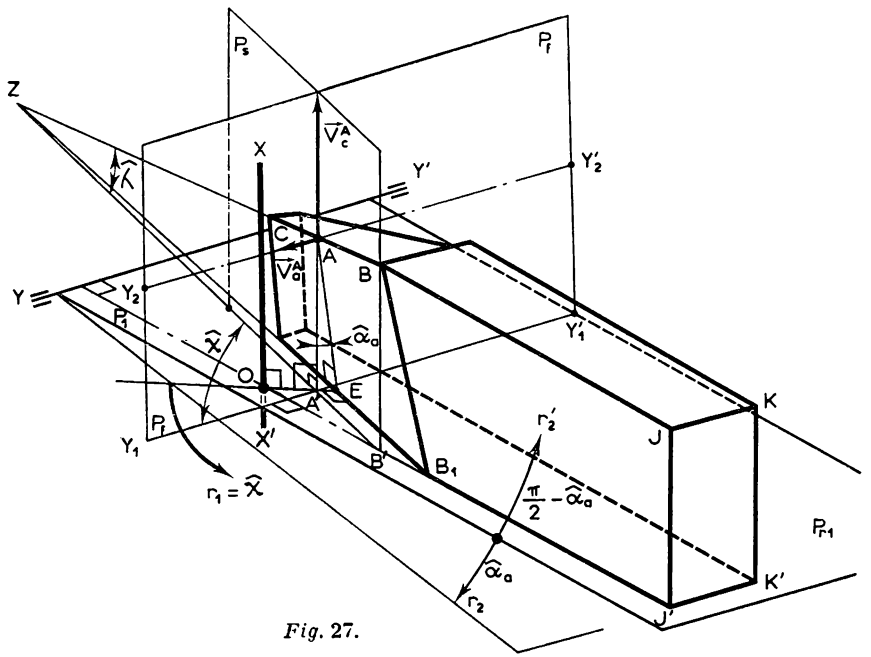


Fig. 27.

La résolution du travail est la même que précédemment et, de ce fait, on utilise le même matériel. La droite AE est la droite de plus grande pente de la face de dépouille $ABEB_1$. La droite B'A' est la projection de l'arête BAC.

Nous supposons XX' normal à P_{r1} et passant par le point O disposé sur le prolongement de A'E. Le plan de travail est P_f qui contient $\vec{V}_c^A$ et $\vec{V}_a^A$. Le plan d'arête est le plan P_s qui contient l'arête BAC et sa projection B'A'Z; il contient $\vec{V}_c^A$. L'angle de dépouille direct d'affûtage est $\widehat{\alpha_a}$. L'angle dièdre des plans P_s et P_f, matérialisé sur le plan P_{r1} par $ZA'Y_1$, est l'angle χ de direction d'arête.

La première rotation de l'outil se fait dans le plan P_{r1} autour de XX' d'un angle χ et permet de situer le plan P_s parallèle à YY'.

La seconde rotation autour de YY' du plan P_{r1} et de son outil permet de situer la face de dépouille dans un plan vertical (rotation r_2) ou horizontal (rotation r'_2).

REMARQUE. — Dans l'un ou l'autre cas, l'ordre des rotations est indifférent.

AFFUTAGE

Le support d'outil orientable pour machines à affûter.

Nous donnons, sur la *figure* 33, le schéma d'un support orientable. Il représente la vue d'un matériel de démonstration qui pourrait être exécuté.

Il comprend :

— Un support d'outil orientable autour d'un axe vertical xx' ;

— Un support inclinable autour d'un axe horizontal yy' ;

— Un bâti orientable autour d'un axe vertical vv' ;

— Une semelle fixée sur la table de la machine et dégauchie au moyen de lardons pouvant être introduits dans la rainure longitudinale de la table.

L'outil est disposé dans le support orientable ; ses génératrices sont perpendiculaires à l'axe horizontal yy' (voir *figure* 33).

La rotation, d'un angle égal à $\widehat{\alpha}$, s'effectue autour de l'axe xx'.

La rotation, d'un angle égal à $\widehat{\gamma_c}$, s'effectue autour de l'axe yy', lorsqu'il s'agit d'affûter la surface d'attaque.

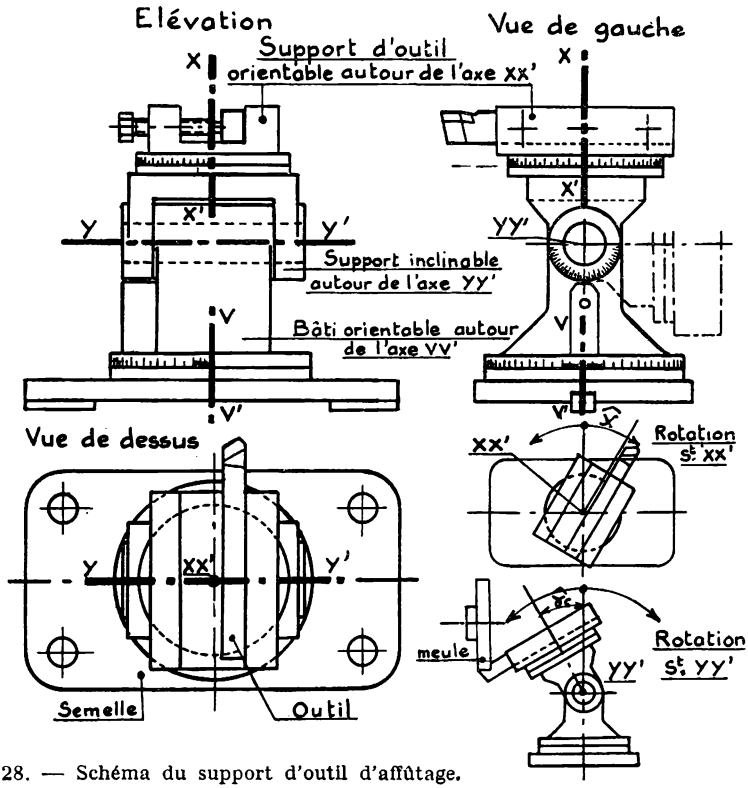


Fig. 28. — Schéma du support d'outil d'affûtage.

Affûtage d'un outil sur une machine comportant une meule plate cylindrique.

a) *Affûtage de la face de coupe.*

Le plan de travail est horizontal. La *figure* 29 représente la suite des opérations.

Au départ, l'outil est placé de façon que ses génératrices soient parallèles à l'axe de rotation de la meule.

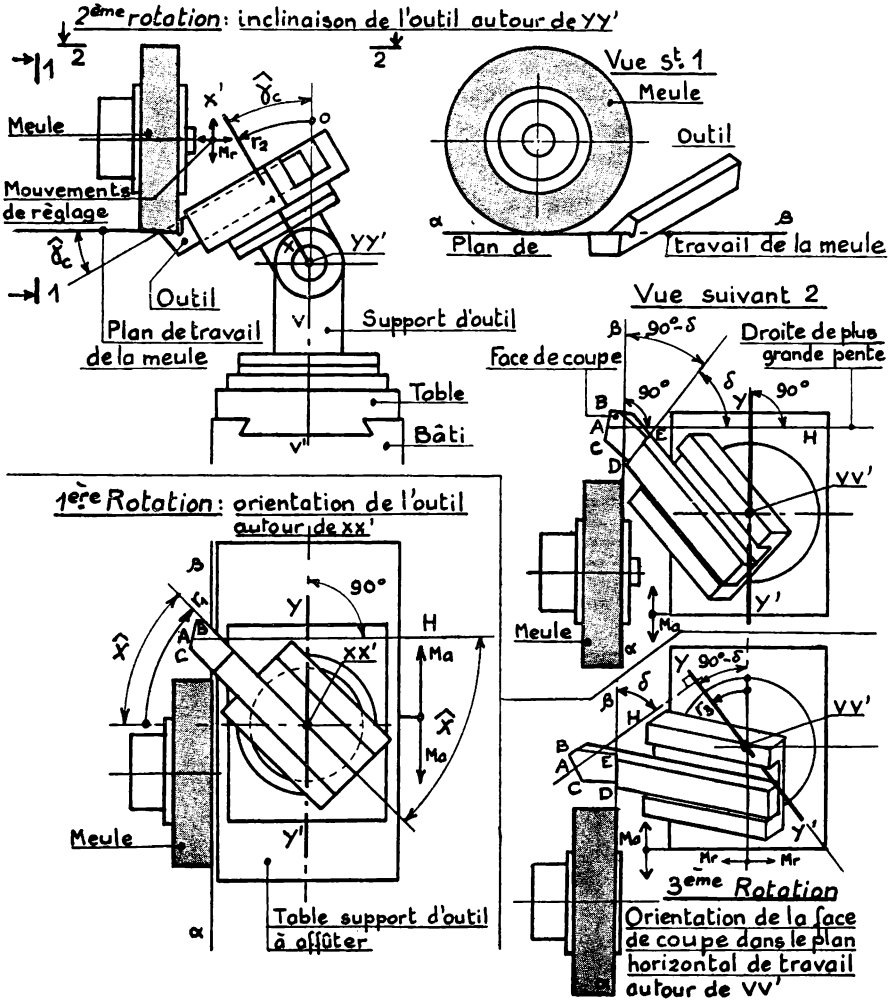


Fig. 29. — Utilisation du support d'outil pour réaliser l'affûtage avec une meule cylindrique : affûtage de la face de coupe.

1re rotation : orientation de l'outil autour de xx′ (fig. 29).

On produit la rotation r_1 autour de xx', de la valeur d'un angle $\widehat{\chi}$. Elle a pour effet d'amener la projection de la droite de plus grande pente AH normale à yy'.

2e rotation : inclinaison de l'outil autour de yy′ (fig. 29).

On exécute la rotation r_2 autour de l'axe horizontal yy', de la valeur d'un angle $\widehat{\gamma_c}$. La face de coupe de l'outil est dans le plan horizontal.

On règle la position de la meule suivant Mr pour amener le plan de travail sur la face de coupe de l'outil.

Dans cette position, comme l'indique la *vue suivant* 2, la partie meulée est celle qui est pointillée.

3e rotation : orientation de la face de coupe dans le plan horizontal de travail autour de vv′ (fig. 29).

Si l'on souhaite meuler toute la face de coupe, une troisième rotation r_3 est nécessaire autour d'un axe vertical vv', de façon que la face de coupe reste dans un plan horizontal.

Si le côté DE de la face de coupe fait un angle $\widehat{\delta}$ avec la droite de plus grande pente AH, on fera tourner le bâti d'un angle égal à $90° - \widehat{\delta}$.

Ainsi après réglage suivant Mr, on aura rendu le côté DE en coïncidence avec la droite limite de meulage $\alpha\beta$.

b) *Affûtage de la face de dépouille.*

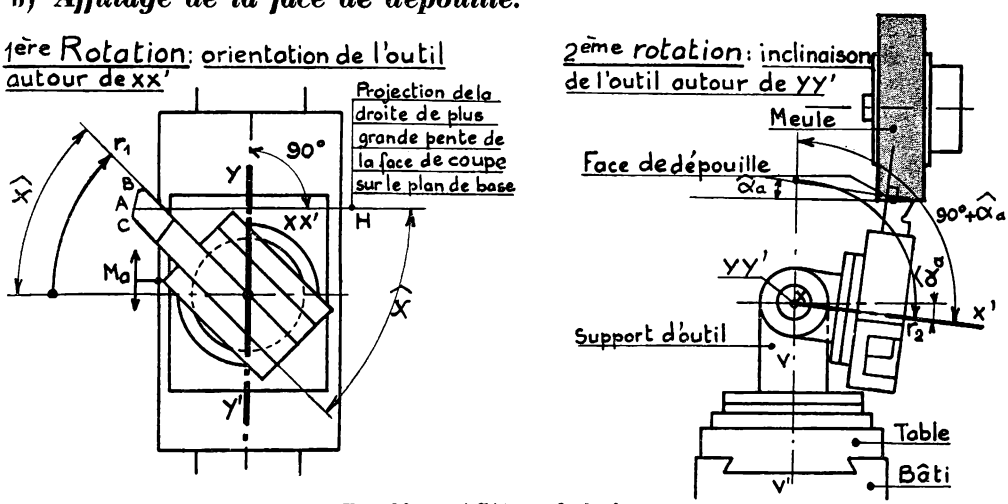


Fig. 30. — Affûtage de la face de dépouille avec une meule cylindrique.

Deux rotations sont encore indispensables (voir *fig.* 30) :

— Une rotation r_1 autour de l'axe vertical xx', de la valeur d'un angle $\widehat{\chi}$;

— Une rotation autour de l'axe horizontal yy′, de la valeur d'un angle $90° + \widehat{\alpha_a}$.

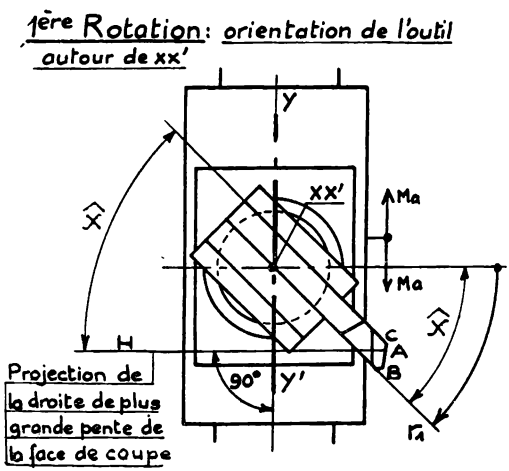
Affûtage d'un outil comportant une meule boisseau.

a) *Affûtage de la face de coupe.*

Le plan de travail de la meule boisseau est vertical (voir *fig.* 31).

Pour amener la face d'attaque dans ce plan, deux rotations sont indispensables :

— une première rotation r_1 autour de l'axe vertical xx', de la valeur d'un angle $\widehat{\chi}$ pour que la projection AH de la droite de plus grande pente de la face de coupe sur le plan de base soit perpendiculaire à l'axe horizontal yy' ;



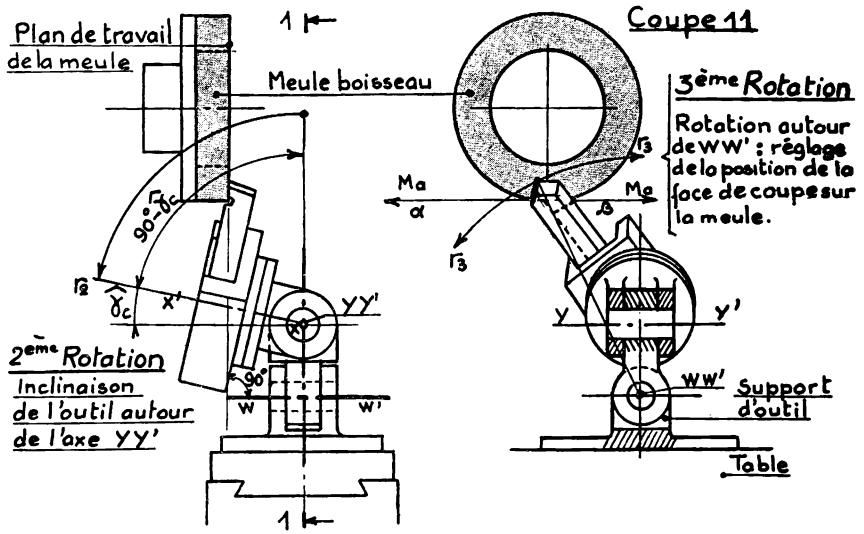


Fig. 31. — Affûtage de la face de coupe d'un outil avec une meule boisseau.

— une seconde rotation r_2 de l'ensemble support-outil autour d'un axe horizontal yy', de la valeur d'un angle $90° - \widehat{\gamma_c}$.

Une troisième rotation r_3 devient nécessaire si l'on veut régler la position de l'arête tranchante par rapport à la droite limite de meulage $\alpha\beta$.

Cette rotation de l'outil doit se faire autour d'un axe perpendiculaire au plan vertical de travail, puisque la face de coupe doit rester verticale. C'est l'axe horizontal ww' ; il est perpendiculaire à yy'.

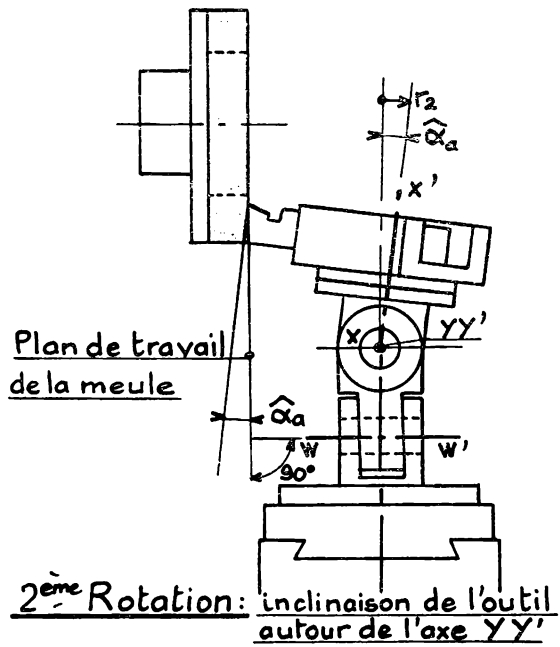


Fig. 32. — Affûtage de la face de dépouille sur meule boisseau.

b) *Affûtage de la face de dépouille.*

Deux rotations sont encore nécessaires pour amener la face de dépouille dans le plan de travail :

— une rotation de la valeur d'un angle $\widehat{\varkappa}$ autour de l'axe vertical xx' (*fig.* 31), première rotation) ;

— une rotation r_2 autour de l'axe yy' (*fig.* 32) pour amener la face en dépouille dans le plan de travail. L'angle de cette rotation a pour valeur l'angle de dépouille $\widehat{\alpha_a}$.

Sur beaucoup de machines, prévues pour affûter la face de dépouille des outils, la table-support peut être inclinée d'un angle $\widehat{\alpha_a}$. Une réglette servant à diriger l'outil est inclinée d'un angle $\widehat{\varkappa}$ par rapport à la normale A'P à la droite *yy'*, parallèle au plan de travail (voir *fig.* 33).

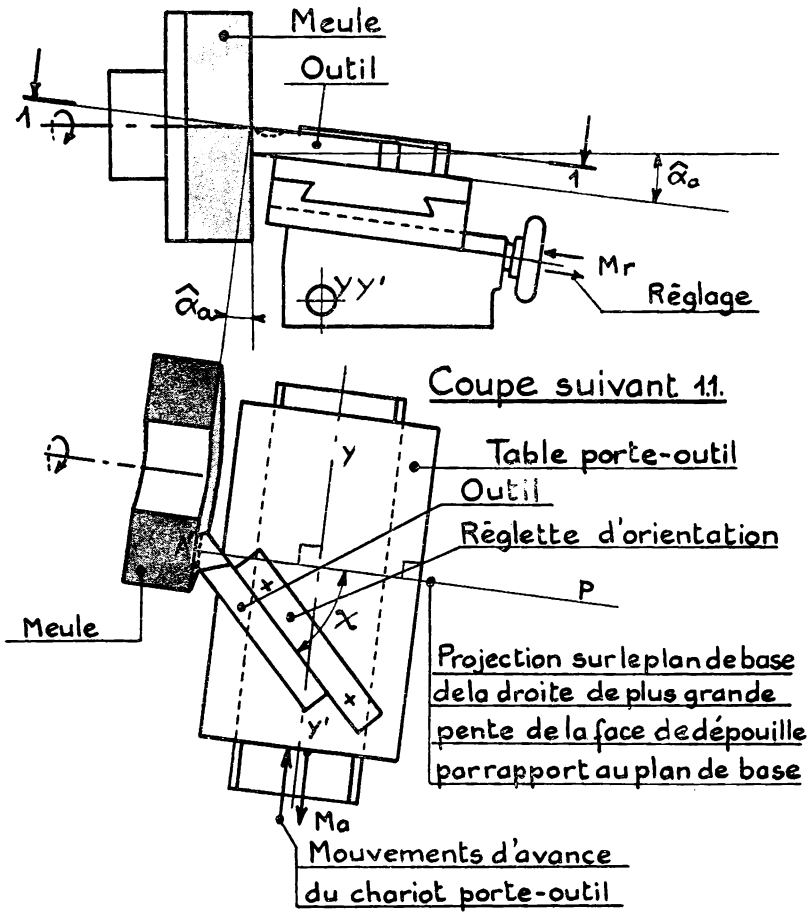


Fig. 33. — Affûtage de la face de dépouille d'un outil sur une machine à table inclinable.

La droite A'P est la projection, sur le plan de base, de la droite de plus grande pente de la face de dépouille par rapport au plan de base. L'angle $\widehat{\varkappa}$ est l'angle que fait A'P avec les génératrices de l'outil.

Machine à affûter à touret porte-meules pivotant.

Sur certaines machines, le touret porte-meules peut être orienté, autour d'un axe vertical *uu'* (*fig.* 34), suivant *f* ou *f'*. Cet axe peut se substituer à l'axe vertical *vv'* prévu sur le porte-outil orientable de la *figure* 29.

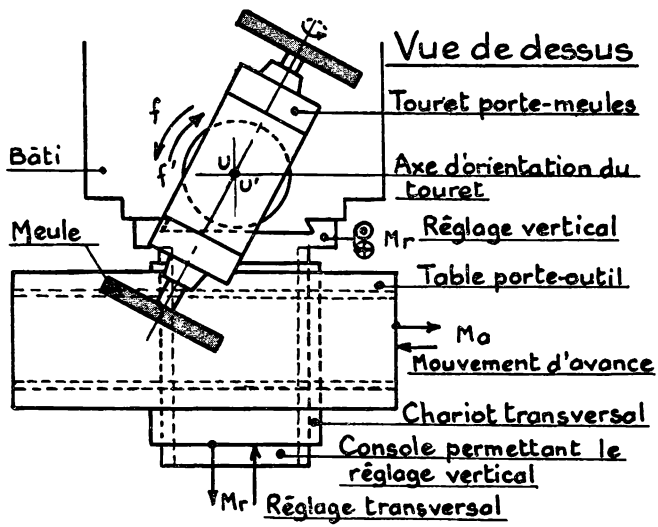


Fig. 34. — Machine à affûter avec touret porte-meule orientable.

Le déplacement de la table porte-outil est assuré dans le sens transversal, grâce à un chariot mobile dans ce sens et, dans le sens vertical, grâce à une console sur laquelle est monté l'ensemble chariot-table porte-outil.

Cette console peut être supprimée, à condition de rendre réglable en hauteur le support du touret.

Certaines machines possèdent en outre un support de touret orientable autour d'un axe horizontal : dans le cas des meules boisseau, cet axe se substitue à l'axe *ww'* du support d'outil représenté sur la *figure* 31).

Affûtage d'outils en série.

Quel que soit le type de machine employé, on peut substituer aux porte-outil articulés, représentés sur les *figures* 29 et 31, des porte-outil monoblocs conçus et usinés pour donner directement, aux outils de même forme, les orientations convenables par rapport à la meule d'affûtage. Les mouvements sont automatisés.

Profil recommandé pour les outils

La chaleur produite par la coupe du métal doit en partie se dégager par conductibilité à travers le corps de l'outil. Plus le dégagement de la chaleur sera rapide, plus sera faible la température de l'extrémité de l'outil.

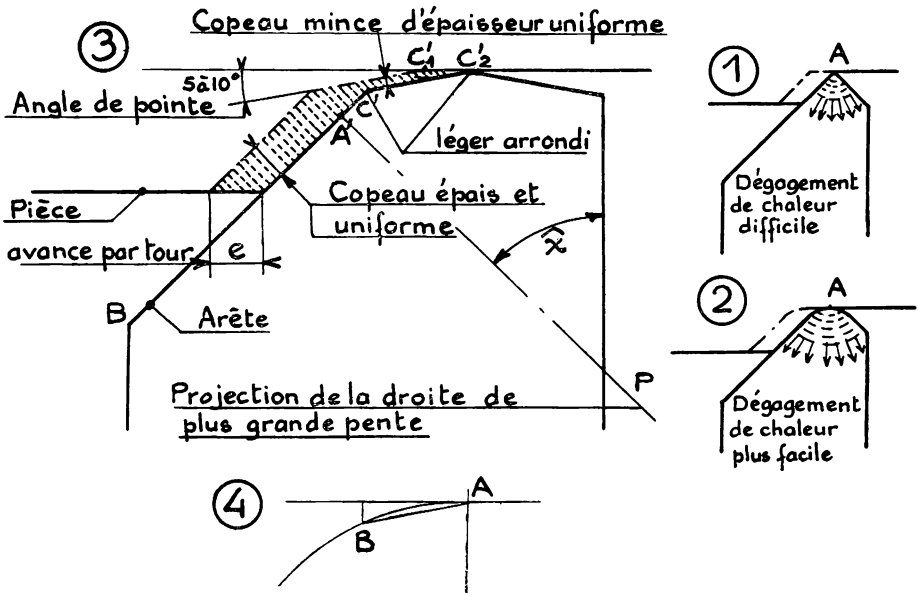


Fig. 35. — Forme à donner aux outils pour faciliter le dégagement de chaleur.

L'examen de la *figure* 35 (*vues* 1 et 2) montre que le dégagement de chaleur est plus facile quand l'extrémité de l'outil est moins aiguë. La forme arrondie de l'extrémité a l'inconvénient d'imposer à l'outil la taille d'un copeau dont l'épaisseur est inférieure au copeau taillé minimum, sur une partie assez importante ; d'autre part, ce copeau a quelque difficulté à s'enrouler.

Le profil polygonal (*vue* 3) peut être tracé de façon que, sur presque toute la longueur C'_2A', le copeau ait une épaisseur constante, supérieure à celle du copeau taillé minimum. La *vue* 4, tracée à la même échelle que la *vue* 3, montre la différence d'épaisseur des copeaux dans le cas du profil polygonal et du profil curviligne.

L'affûtage de cet outil se fait avec face d'attaque plane, d'où une obliquité d'arête différente pour les deux parties, AB et BD.

L'affûtage de cet outil se fait avec face de coupe plane, d'où une direction d'arête différente pour les deux parties, C'_2C' et C'B.

La vitesse de coupe

Nous avons dit, au début du chapitre précédent, ce que l'on appelle **vitesse de coupe**. Rappelons que la **vitesse de coupe supposée en un point A de l'arête de l'outil est la vitesse relative de l'outil par rapport à la pièce.**
Elle se mesure en *mètres par minute.*

La vitesse de coupe est un facteur important de la production. Plus la vitesse de coupe est grande, plus le temps d'usinage est petit. Toutes les conditions de travail restant les mêmes, la quantité de chaleur résultant du travail de coupe pendant un temps déterminé augmente avec la vitesse de coupe. Comme cette chaleur doit être évacuée en partie par le métal qui constitue l'outil, la température de la partie active de l'outil augmente, sa dureté diminue, son usure se produit plus rapidement : l'outil est rapidement hors d'usage.

Il existe une vitesse-limite qui correspond à l'usure immédiate de l'outil et, pour un travail déterminé, une vitesse économique qui correspond au meilleur prix de l'usinage, compte tenu du coût de l'affûtage de l'outil.

De nombreux travaux ont été faits pour rechercher quelles sont les vitesses de coupe les plus avantageuses à utiliser. Aucune conclusion définitive n'a pu être établie ; le choix de la vitesse de coupe dépend, en effet, d'un très grand nombre de facteurs et les essais à effectuer sont toujours très longs, puisque ce sont des essais fondés sur l'usure de l'outil.

Facteurs dont dépend la vitesse de coupe

Les facteurs qui ont une influence sur le choix de la vitesse de coupe dépendent de l'*outil,* de la *matière usinée,* des *conditions de coupe.*

1° Facteurs qui dépendent de l'outil.

a) **Nature et traitement thermique du métal constituant l'outil.**

b) **Forme de la partie active et dimensions** : profil, angles de coupe.

c) **Fini de la face de coupe.**

La vitesse de coupe peut être d'autant plus grande que le matériau qui constitue l'outil est plus dur et conserve cette dureté à température élevée. Elle pourra être également importante si la partie active est massive (favorisant l'évacuation de la chaleur) et si l'écoulement du copeau est facile : l'outil à charioter semble être celui qui permet les plus grandes vitesses de coupe.

Le poli de la face de coupe, en diminuant le frottement du copeau et, par suite, la chaleur produite, rend possible une augmentation de la vitesse de coupe.

2° Facteurs qui dépendent du métal à usiner.

a) **Nature métallurgique** : composition, état laminé, étiré ou coulé.

b) **Dureté et résistance à la traction.**

c) **Caractère d'usinabilité et d'abrasion.**

Le métal laminé, lorsqu'il est malléable, peut être coupé sans excessive dépense d'énergie ; la chaleur produite étant réduite, la vitesse de coupe peut être plus grande.

Il faut réduire la vitesse si le métal à tailler est dur, s'il est susceptible de s'écrouir et s'il possède des qualités abrasives importantes. Le facteur qui influe le plus sur le choix de la vitesse de coupe est la résistance à la rupture : à grande résistance à la rupture, petite vitesse de coupe, et inversement.

3° Facteurs qui dépendent des conditions de coupe.

a) **Avance par tour ou par coup.**

b) **Profondeur de passe.**

c) **Lubrification.**

d) **Genre d'usinage** : discontinu ou continu.

La vitesse peut être choisie d'autant plus grande que l'énergie produite par la coupe sera faible et la chaleur correspondant à ce travail facilement évacuée.

Donc la vitesse de coupe augmente :

— si la section du copeau est faible ;
— si l'épaisseur du copeau est faible (petite avance, angle de direction peu important) ;
— si l'outil est correctement refroidi (lubrification abondante).

Lorsque la coupe est discontinue, on a intérêt à diminuer la vitesse de coupe, afin de limiter les effets de choc au début de chaque passe.

Études expérimentales concernant les vitesses de coupe

Taylor a, le premier, effectué une étude expérimentale relative à la détermination des vitesses de coupe types, en fonction des différents facteurs, pour des dimensions de copeaux données et une durée de l'outil bien déterminée.

Herbert a repris les travaux de Taylor et, pour l'expérimentation, il a imaginé une machine spéciale. Le commandant **Denis**, en opérant sur la machine Herbert, a étudié systématiquement le problème et c'est lui qui en a poussé le plus loin l'étude.

Ses travaux sont à la base de la détermination pratique des vitesses de coupe.

Ils ont beaucoup aidé les ingénieurs qui, après lui, se sont intéressés à l'amélioration du rendement de la coupe, notamment les ingénieurs du Laboratoire national de l'armement.

Nous limiterons volontairement cette étude aux travaux du commandant Denis.

VITESSES DE COUPE DES OUTILS EN ACIER RAPIDE

A. — Vitesse de moindre usure. Débit d'un outil. Vitesse de coupe limite

Les essais du commandant Denis, effectués avec des outils en acier fondu au carbone, en acier rapide ordinaire à 14 % de tungstène et en acier rapide supérieur à 18 % de tungstène, ont mis en évidence les faits suivants :

Pour un travail déterminé (chariotage au tour, fraisage, rabotage ou perçage), les conditions d'usinage restant les mêmes (travail lubrifié ou à sec, avance et profondeur de passe identiques), il a été constaté qu'un outil s'use rapidement si la vitesse de coupe est très grande ou si elle est très petite.

Il existe donc une vitesse de coupe intermédiaire pour laquelle le rendement de l'outil est maximum.

Cette vitesse est appelée **vitesse de moindre usure.**

Le rendement d'un outil est caractérisé par le volume de copeaux qu'il est susceptible de produire avant qu'un réaffûtage soit jugé nécessaire.

Lorsqu'un outil doit être réaffûté, son arête tranchante émoussée produit un copeau arraché : la surface de la pièce est rugueuse.

On appelle **débit d'un outil** le volume de copeau, exprimé en décimètres cubes, que cet outil est susceptible de produire entre deux réaffûtages.

Les **expériences** ont été réalisées de la façon suivante :

Chariotage au tour sans lubrification.

Sur un tour puissant on monte une grosse barre d'acier $(R_r)_e = 500$ N/mm² et un outil en acier rapide supérieur fraîchement affûté. L'avance par tour est prise égale à 0,5 mm et la profondeur de passe 5 à mm.

La vitesse de coupe choisie étant V_1 (m/mn), on met la machine en route jusqu'à ce que l'outil soit usé. Par différence de volume de la barre, on mesure le débit de copeaux, soit D_1 dm³. L'outil est réaffûté ; puis, la vitesse étant réglée à une deuxième valeur V_2, on détermine de la même façon le débit correspondant D_2.

Si l'on multiplie ces expériences, il est possible, avec les résultats obtenus, de tracer une courbe des débits de l'outil en fonction des vitesses de coupe correspondantes.

La courbe, tracée sur la *figure* 1, présente un maximum A auquel correspond la *vitesse de moindre usure* V_0 qui permet à l'outil de produire un **débit de copeaux maximum** D_0.

Au point B correspond la *vitesse limite* V_l pour laquelle l'usure de l'outil est instantanée, le débit correspondant étant nul. On a sensiblement :

$$V_l = V_0 + \frac{2}{3}V_0.$$

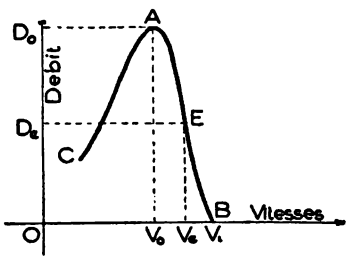


Fig. 1. — Variations de la vitesse de coupe en fonction du débit. Courbe à un maximum.

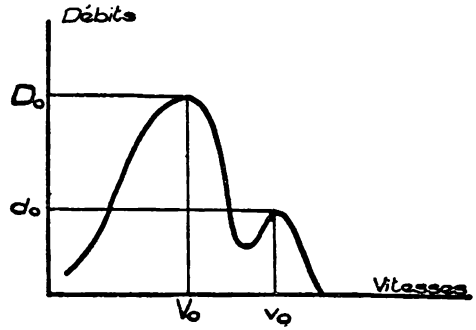


Fig. 2. — Variations de la vitesse de coupe en fonction du débit. Courbe à deux maxima.

Pour les aciers rapides supérieurs on obtient des courbes à deux maxima représentées par la *figure* 2. On adopte le second maximum.

L'étude qui va suivre ne portera que sur les travaux donnant lieu à des courbes de débit à un seul maximum. D'ailleurs, dans les deux cas, les résultats sont sensiblement identiques.

B. — Facteurs influant sur la valeur de la vitesse de moindre usure

Les expériences ont montré que la vitesse de moindre usure varie :

a) *avec le mode de travail* : tournage, fraisage, perçage, rabotage ;
b) *avec le métal travaillé* ;
c) *avec la qualité du métal* choisi pour la fabrication *de l'outil* ;
d) *avec les conditions de lubrification* ;
e) *avec les dimensions du copeau* (avance et profondeur de passe).

Les nombreux essais du commandant Denis ont été réalisés en faisant varier successivement chaque facteur, les autres étant maintenus constants.

1° Variation de V_0 avec le mode de travail.

Les essais ont porté sur des travaux de chariotage au tour, de fraisage, de perçage au foret hélicoïdal. Pour chaque série d'essais, toutes les courbes relevées présentent la même forme.

2° Variation de V_0 avec le métal travaillé.

Les différents essais ont été réalisés avec un même outil, le mode de travail ne changeant pas, les conditions de lubrification restant identiques ainsi que l'avance et la profondeur de passe. Les essais de chariotage ont été faits à sec avec une avance par tour $a_0 = 0{,}5$ mm, et une profondeur de passe $p_0 = 5$ mm.

Les essais de fraisage ont été réalisés avec arrosage sans pression, les conditions types de travail étant : avance par dent et par tour $a_0 = 0{,}05$ mm ; largeur du copeau $p_0 = 50$ mm (voir *fig.* 3).

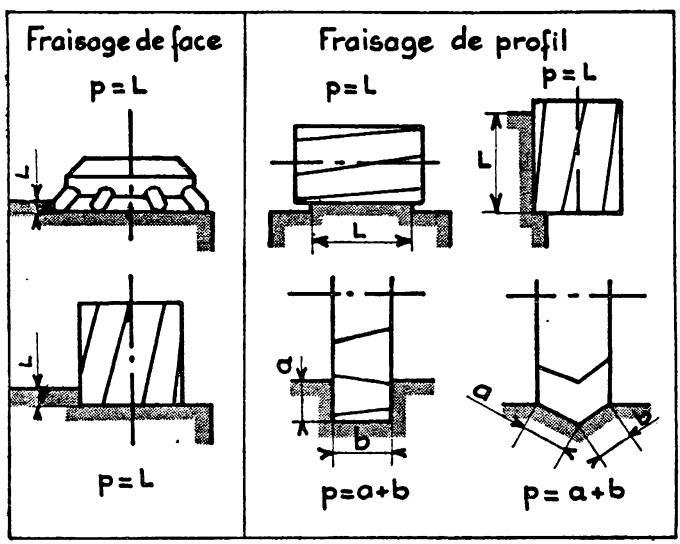


Fig. 3. — Largeur du copeau dans le fraisage.

Les essais de perçage ont été réalisés avec lubrification sous pression, les conditions types de travail étant :

Avance par tour : $a_0 = 0{,}25$ mm.

Diamètre du foret : $d_0 = 25$ mm.

Les courbes de débit tracées, par exemple, à la suite d'essais de chariotage à sec, avec $a = 0{,}5$ mm, $p = 5$ mm et un outil en acier rapide supérieur, montrent

que les vitesses de moindre usure et les débits maxima correspondants vont en diminuant quand augmente la résistance à la rupture du métal (voir *fig.* 4).

Ainsi on a :

Bronze :

$V_{01} = 47$ m/sec ;
$D_{01} = 34$ dm³.

Acier $(R_r)_e = 400$ N/mm².

$V_{02} = 31$ m/sec ;
$D_{02} = 23$ dm³.

Acier $(R_r)_e = 700$ N/mm².

$V_{03} = 18$ m/sec ;
$D_{03} = 12$ dm³.

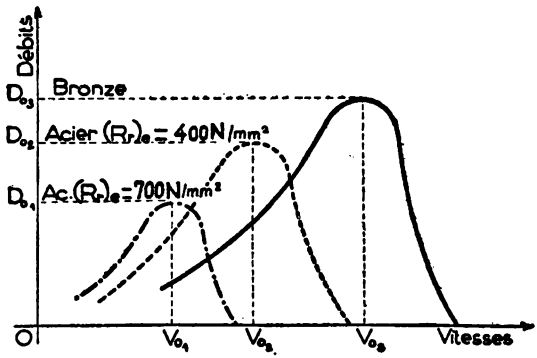


Fig. 4. — Variations de la vitesse de moindre usure V_0 en fonction de la nature du métal travaillé.

3° Variation de V_0 avec la qualité du métal choisi pour la fabrication de l'outil.

Pour des conditions de travail identiques, les expériences ont montré que la vitesse de moindre usure et les débits maxima vont en augmentant lorsque s'améliorent les qualités du métal qui constitue l'outil. Les essais du commandant Denis ont porté sur des outils en acier fondu au carbone, en acier rapide ordinaire à 15 % de W, en acier rapide supérieur à 18 % W, 1 % Mo et 1 % Va.

Il n'a pas été fait d'expériences analogues avec des outils en acier rapide extra supérieur au cobalt, ni avec des outils en carbure métallique.

En première approximation, on trouve les vitesses de coupe des outils en acier rapide supérieur en multipliant par 1,5 les vitesses prévues pour les outils en acier rapide ordinaire. En multipliant ces dernières par 3, on obtient les vitesses de coupe des outils en carbure métallique.

Les courbes de débit tracées, par exemple, à la suite d'essais de chariotage à sec sur de l'acier $(R_r)_e = 700$ N/mm², avec une avance $a = 0{,}5$ mm et une profondeur de passe $p = 5$ mm, sont représentées par la *figure* 5.

On peut ainsi y relever :

Outil en acier fondu au carbone : $V_{01} = 6$ m/mn ; $D_{01} = 9{,}5$ dm³ ;
Outil en acier rapide ordinaire : $V_{02} = 15$ m/mn ; $D_{02} = 11$ dm³ ;
Outil en acier rapide supérieur : $V_{03} = 18$ m/mn ; $D_{03} = 12$ dm³.

Ces courbes sont semblables : elles peuvent être considérées comme dérivant de l'une d'entre elles (courbe de base) dont les abscisses et les ordonnées seraient multipliées par des coefficients.

Pour un même métal, l'expérience a montré que la vitesse de moindre usure et le débit maximum varient suivant le traitement thermique subi par l'acier à outil. Le traitement thermique optimum est celui qui a permis au métal de conserver sa dureté à la plus haute température ; il comprend nécessairement une trempe et un revenu :

Aciers fondus au carbone : trempe à l'eau à 780° et revenu à 200°.

Aciers rapides ordinaires : trempe à l'huile à 1 150° et revenu à 550° pendant 20 mn.

Aciers rapides supérieurs : trempe au plomb ou à l'huile à 1 250° et revenu à 600° pendant 20 mn.

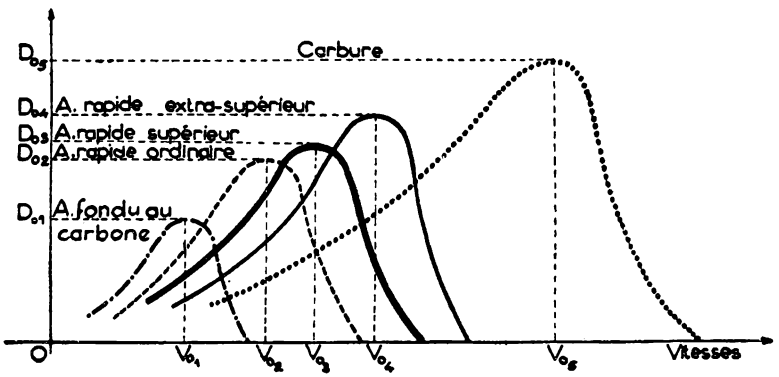


Fig. 5. — Variations de la vitesse de moindre usure V_0 en fonction du métal constituant l'outil.

4° Influence de la lubrification sur la valeur de V_0.

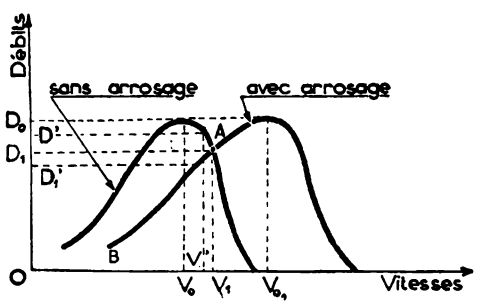


Fig. 6. — Influence de l'arrosage sur la vitesse de moindre usure.

Pour un même métal usiné, un même outil, le même travail, les dimensions du copeau restant identiques, l'expérience a montré que la vitesse de moindre usure V_0 augmente si l'on passe de l'usinage à sec à l'usinage lubrifié ; par contre, le débit maximum reste identique dans les deux cas.

Les résultats des essais sont représentés graphiquement sur la *figure* 6.

Désignons par V_1 la vitesse correspondant à l'intersection des deux courbes.

Le débit D_1, obtenu à cette vitesse, est le même, qu'il s'agisse de travail à sec ou lubrifié. Mais, si l'on choisit une vitesse $V' < V_1$, l'examen du graphique

montre que le débit D', entre deux réaffûtages, correspondant au travail à sec est plus grand que le débit D'_1, obtenu avec un usinage lubrifié. Il ne faut donc pas choisir une vitesse de coupe trop faible lorsqu'on travaille avec lubrification.

A la suite des nombreux essais effectués, on a pu établir les résultats suivants :

a) ***Chariotage (tour, raboteuse, étau-limeur).***

Si V_0 est la vitesse de moindre usure à sec et V_{01} la vitesse de moindre usure avec lubrification abondante sous pression, on a :

$$V_{01} = \frac{3}{2} V_0.$$

b) ***Perçage.***

Si n_0 est la vitesse de moindre usure à sec en tours par minute en n_{01} la vitesse de moindre usure avec lubrification abondante sous pression, on a :

$$n_{01} = \frac{3}{2} n_0.$$

c) ***Fraisage.***

Si V_0 est la vitesse de moindre usure avec arrosage au pinceau ou au moyen d'un filet liquide tombant sans pression et V_{01} la vitesse avec lubrification abondante sous pression, on a :

$$V_{01} = \frac{5}{4} V_0.$$

5° Influence des dimensions du copeau sur la valeur de V_0.

La dernière série d'essais a été exécutée en maintenant invariables : le mode de travail, le métal constituant l'outil, le métal travaillé, les conditions de lubrification.

On a fait varier les dimensions du copeau :

a) *Chariotage* : avance par tour *a* et profondeur de passe *p*.

b) *Fraisage* : avance par dent et par tour *a*, et somme des largeurs de passe et de coupe *p*.

c) *Perçage* : avance du foret par tour *a* et diamètre du foret *d*.

Les résultats des nombreux essais ont permis d'établir une loi importante, connue sous le nom de **loi du débit constant**, qui s'énonce comme suit :

Lorsqu'on fait varier les dimensions du copeau, les autres conditions de l'usinage ne changeant pas :

1° **Le débit maximum reste constant.**

2° **Les différentes valeurs de la vitesse de moindre usure V_0, V_1, V_2, etc. sont liées aux dimensions des copeaux a_0p_0, a_1p_1, a_2p_2, par la relation :**

$$V_0^3 \times a_0^2 \times p_0 = V_1^3 \times a_1^2 \times p_1 = V_2^3 \times a_2^2 \times p_2 = \text{constante.}$$

Cette relation est valable pour les travaux de chariotage, fraisage et perçage ; V s'exprime en mètres par minute, a et p en millimètres.

Les essais du commandant Denis ont eu pour objet d'établir les valeurs de V_0, dans les conditions de coupe type a_0 et p_0, pour les différents procédés de travail. Si l'on se donne a_1 et p_1, il est donc possible, en utilisant la relation précédente, de calculer V_1. On a, en effet :

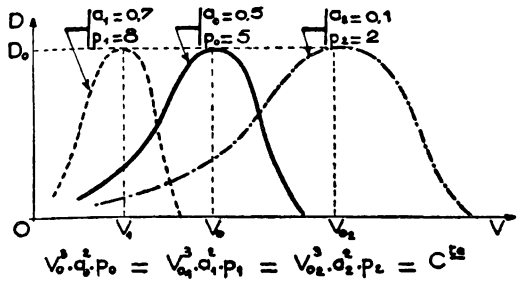


Fig. 7. — Influence des dimensions du copeau sur la vitesse de moindre usure.

$$V_1^3 = V_0^3 \times \frac{a_0^2 \times p_0}{a_1^2 \times p_1};$$

d'où : $$V_1 = V_0 \sqrt[3]{\frac{a_0^2 \times p_0}{a_1^2 \times p_1}}.$$

Pour le perçage, puisque $p = \frac{d}{2}$ et que V est proportionnel au diamètre d et au nombre de tours par minute n, la relation précédente peut s'écrire :

$$n_0^3 \times d_0^4 \times a_0^2 = n_1^3 \times d_1^4 \times a_1^2 = \text{Cte};$$

d'où l'on déduit : $$n_1 = n_0 \sqrt[3]{\frac{d_0^4 \times a_0^2}{d_1^4 \times a_1^2}}.$$

C. — Vitesse économique

Supposons que l'on ait à réaliser un travail nécessitant la production d'un grand volume de copeaux. Si les outils employés sont difficiles à mettre en place (outils de tours automatiques, de machines à tailler), ou de réalisation délicate (outils de forme), d'affûtage long (fraises), il est évident que la vitesse de coupe à adopter sera la vitesse de moindre usure, car c'est elle qui permet le plus grand débit entre deux réaffûtages.

Au contraire, lorsqu'on utilisera des outils de forme courante, dont le montage et le réglage sont faciles à réaliser (outils à charioter, forets), on aura intérêt, pour exécuter le travail plus rapidement, à choisir une vitesse supérieure à la vitesse de moindre usure, mais cependant inférieure à la vitesse limite.

La vitesse choisie porte le nom de **vitesse économique pratique** V_e. Les courbes de débit étant semblables entre elles, on choisit généralement une vitesse :

$$V_e = V_0 + \frac{1}{2}V_0 = \frac{3}{2}V_0,$$

pour laquelle le débit entre deux réaffûtages $D_r = \frac{D_0}{2}$ (voir *fig.* 1, p. 258).

Dans ce cas, le temps de coupe sera les $\frac{2}{3}$ du temps mis en utilisant la vitesse de moindre usure, mais il faudra réaffûter l'outil deux fois plus souvent.

Pour des vitesses comprises entre V_0 et V_e, les débits correspondants sont donnés par le tableau A.

TABLEAU A

Vitesse	V_0	Débit maximum	D_0
	$V_0 + \frac{1}{5} V_0$	Débit	0,9 D_0
	$V_0 + \frac{1}{4} V_0$	»	0,8 D_0
	$V_0 + \frac{11}{40} V_0$	»	0,7 D_0
	$V_0 + \frac{3}{10} V_0$	»	0,6 D_0
Vitesse V_e =	$V_0 + \frac{1}{3} V_0$	»	0,5 D_0

D. — Calcul pratique des vitesses de coupe

On utilise pour cela les résultats des essais du commandant Denis qui sont consignés sur des tableaux dont nous donnons ci-dessous des extraits :

1° Calcul des vitesses de coupe de chariotage.

Premier exemple.

Exécution, sur tour à charioter et à fileter avec un outil en acier rapide supérieur, d'un travail de finition sur des barres cylindriques en acier $(R_r)_e = 800$ N/mm².

Données du travail : longueur à charioter : 180 mm ; diamètre avant chariotage : 80 mm ; diamètre à obtenir : 77 mm.

Conditions de coupe : avance par tour $a_1 = 0{,}2$ mm ;

profondeur de passe $p_1 = \frac{80 - 77}{2} = 1{,}5$ mm.

Le chariotage se fera à sec et à la vitesse de moindre usure.

SOLUTION.

Le tableau B nous donne . $V_0 = 14$ m/mn , $D_0 = 9$ dm³.

Conditions types : $a_0 = 0{,}5$ mm ; $p_0 = 5$ mm.

La loi du débit constant permet d'écrire :

$$V_1 = V_0 \sqrt[3]{\frac{a_0^2 \times p_0}{a_1^2 \times p_1}};$$

d'où

$$V_1 = 14 \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2 \times 5}{0{,}2^2 \times 1{,}5}} = 38 \text{ m/mn.}$$

TABLEAU B. — CHARIOTAGE A SEC.

MÉTAL TRAVAILLÉ	OUTIL EN ACIER FONDU		OUTIL EN ARO		OUTIL EN ARS	
	V_0	D_0	V_0	D_0	V_0	D_0
Laiton	22	32	52	38	62	40
Bronze 88/12	17	25	39	30	47	34
Fonte grise	13	10,5	30	12,5	36	13,5
Acier R = 400 *N/mm²*	11	18	26	21	31	23
600	7	12	18	14	22	15,5
800	5	7	12	6	14	9
900	3	4,5	3	8,5	11	6
1100	1	0,24	4	0,65	5	0,75

Avance par tour ou par coup $a_0 = 0{,}5$ *mm*. V_0 Vitesse de moindre usure en *m/mn*.
Profondeur de passe $p_0 = 5$ *mm*. D_0 Débit maximum en *dm³*.

Deuxième exemple.

Exécution, sur tour à charioter et à fileter avec un outil en acier rapide supérieur, d'un travail de dégrossissage sur des barres cylindriques $(R_r)_e = 600$ N/mm².

Vitesses de la machine, en tours par minute : 32, 50, 80, 125, 200, 315, 500, 800.

Données du travail : longueur à charioter : 150 mm ; diamètre avant chariotage : 60 mm ; diamètre à obtenir : 48 mm.

Conditions de coupe : avance par tour $a_1 = 0{,}6$ mm ;

profondeur de passe $p_1 = \dfrac{60 - 48}{2} = 6$ mm.

Le chariotage se fera avec lubrification sous pression.

SOLUTION.

a) *Calcul du nombre de tours par minute.*

On adoptera la vitesse économique pratique.

Le tableau B nous donne : $V_0 = 22$ m/mn ; $D_0 = 15{,}5$ dm³.

La vitesse de moindre usure à sec étant de 22 m/mn pour les conditions types, la nouvelle valeur de V_0 avec lubrification est :

$$V_{01} = 22 \times \frac{3}{2} = 33 \text{ m/mn.}$$

Le débit restera égal à $D_0 = 15{,}5$ dm³.

La loi du débit constant donne :

$$V_1 = V_0 \sqrt[3]{\frac{a_0^2 \times p_0}{a_1^2 \times p_1}} = 33 \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2 \times 5}{0{,}6^2 \times 6}} = 28 \text{ m/mn.}$$

La vitesse économique a pour valeur :

$$V_e = V_0 \times \frac{3}{2} = 28 \times \frac{3}{2} = 42 \text{ m/mn.}$$

Le nombre de tours par minute correspondant est :

$$n = \frac{V}{\pi D} = \frac{42}{3{,}14 \times 0{,}06} = 220 \text{ tr/mn.}$$

On choisira donc pour ce travail la vitesse du tour qui en est la plus rapprochée : 200 tr/mn.

b) *Calcul du nombre de pièces exécutées entre deux réaffûtages.*

La vitesse de coupe adoptée est :

$$V = \pi D n = 3{,}14 \times 0{,}06 \times 200 = 38 \text{ m/mn.}$$

Si l'on se reporte au tableau A en remarquant que cette vitesse est comprise entre $V_e = 42$ m/mn et $V_0 + \frac{3}{10} V_0 = 36{,}4$ m/mn, on voit que l'on peut adopter comme débit correspondant :

$$D = 0{,}57 D_0 = 0{,}57 \times 15{,}5 = 8{,}8 \text{ dm}^3,$$

$D_0 = 15{,}5$ étant pris sur le tableau B.

Le volume du métal enlevé sur chaque pièce est de :

$$1{,}5 \times \frac{\pi(\overline{0{,}6^2} - \overline{0{,}48^2})}{4} = 0{,}153 \text{ dm}^3.$$

Le nombre de pièces exécutées entre deux réaffûtages sera de :

$$\frac{8{,}8}{0{,}153} = 57 \text{ pièces.}$$

c) *Calcul du temps de travail de l'outil entre deux réaffûtages.*

Débit possible entre deux réaffûtages : 8,8 dm^3.

Volume de métal enlevé, par minute, en mm^3 :

$$\frac{\pi}{4}(60^2 - 48^2)\,200 \times 0{,}6 = 114 \times 10^3\ mm^3.$$

Volume de métal enlevé, par heure :

$$114 \times 10^3 \times 60 = 6{,}85 \times 10^6\ mm^3 = 6{,}85\ dm^3.$$

Durée de l'outil :

$$\frac{8{,}8}{6{,}85} = 1\ h\,\frac{30}{100} = 130 \text{ centièmes d'heure.}$$

2° Calcul des vitesses de coupe de fraisage.

Exemple.

Exécution, sur fraiseuse verticale, avec une fraise en bout à lames rapportées en acier rapide supérieur $\varnothing = 120$ mm, d'une pièce d'acier dont $(R_r)_e = 800\ N/mm^2$.

Donnée du travail : profondeur de passe $p_1 = 5$ mm.

Conditions de coupe : avance par dent et par tour : $a_1 = 0{,}1$ mm.
largeur du copeau : $p_1 = 5$.

Le travail sera effectué avec lubrification abondante et on adoptera la vitesse de moindre usure.

SOLUTION.

Le tableau C nous donne, comme vitesse de moindre usure avec lubrification à faible débit :

$$V_0 = 13\ m/mn,$$

avec $a_0 = 0{,}05$ mm et $p_0 = 50$ mm.

La vitesse de moindre usure avec lubrification abondante sera :

$$V_{01} = \frac{5}{4}V_0 = \frac{5}{4} \times 13 = 16{,}2\ m/mn.$$

Les conditions de travail étant $a_1 = 0{,}1$ mm et $p_1 = 5$ mm, la loi du débit constant nous donne :

$$V_1 = V_0\sqrt[3]{\frac{a_0^2 \times p_0}{a_1^2 \times p_1}} = 16{,}2\sqrt[3]{\frac{0{,}05^2 \times 50}{0{,}1 \times 5}} = 22\ m/mn.$$

Le nombre de tours par minute de la fraise est :

$$n = \frac{V}{\pi D} = \frac{22}{3{,}14 \times 0{,}120} = 58\ tr/mn.$$

TABLEAU C. — FRAISAGE AVEC LUBRIFICATION A FAIBLE DÉBIT.

MÉTAL TRAVAILLÉ	OUTIL EN ACIER FONDU		OUTIL EN ARO		OUTIL EN ARS	
	V_0	D_0	V_0	D_0	V_0	D_0
Laiton	20	25	24	28	30	36
Bronze 88/12	18	20	20	23,5	25	28
Fonte grise	16	8	17	9	21	10,5
Acier R = 400 N/mm^2	14	14	15	16	19	18
600 »	12	9	13	10	14	12
800 »	10	5	11	6	13	6,5
900 »	9,5	3	10,5	3,5	12	4
1100 »	8	0,05	9	0,32	10	0,35

Avance par tour et par dent $a_0 = 0{,}05$ *mm*.
Largeur du copeau $p_0 = 50$ *mm*

V_0 Vitesse de moindre usure en *m/mn*.
D_0 Débit maximum en dm^3.

3° Calcul des vitesses de coupe de perçage.

Exemple.

Avec un **foret** en acier rapide supérieur, en série illimitée, on veut percer des trous de 16 mm de diamètre, profondeur 20 mm, dans l'acier $(R_r)_e = 600$ N/mm².

Données du travail : profondeur des trous : 20 mm ; diamètre du foret : 16 mm.

Conditions de coupe : avance par tour de foret (voir tableau E) $a_r \leqslant 0{,}20$. On prendra 0,20.

Le travail sera effectué avec lubrification abondante à la vitesse économique pratique.

SOLUTION.

Le tableau D donne la vitesse de moindre usure avec lubrification abondante $n_0 = 40$ tr/mn, débit $D_0 = 9$ dm^3, les conditions types étant $a_0 = 0{,}25$ mm et $d_0 = 25$ mm.

Pour calculer la vitesse de moindre usure correspondant au travail à effectuer, appliquons la loi du débit constant ; on a :

$$n_{01} = n_0 \sqrt[3]{\frac{d_0^4 \times a_0^2}{d_1^4 \times a_1^2}} = 140 \sqrt[3]{\frac{25^4 \times 0{,}25^2}{16^4 \times 0{,}2^2}} = 300 \text{ tr/mn.}$$

La vitesse de coupe à adopter étant la vitesse économique, on a :

$$n_1 = \frac{3}{2} n_{01} = \frac{3}{2} \times 300 = 450 \text{ tr/mn.}$$

a) *Calcul du nombre de trous percés entre deux réaffûtages.*

Supposons que la perçeuse puisse tourner à 450 tr/mn (vitesse calculée).

Le débit correspondant :

$$D_0 = \frac{D_0}{2} = \frac{9}{2} = 4{,}5 \text{ dm}^3.$$

Volume d'un trou en dm³ :

$$\frac{\pi d^2}{4} \times l = \frac{\pi \times 0{,}16^2}{4} \times 0{,}2 = 0{,}004 \text{ dm}^3.$$

Nombre de trous percés entre deux réaffûtages :

$$\frac{4{,}5}{0{,}004} = 1\,120 \text{ trous.}$$

b) *Calcul du temps de travail du foret entre deux réaffûtages.*

Longueur percée entre deux réaffûtages :

$$1\,120 \times 20 = 22\,400 \text{ mm.}$$

Longueur percée à l'heure :

$$450 \times 0{,}2 \times 60 = 5\,400 \text{ mm.}$$

Durée de l'outil :

$$\frac{22\,400}{5\,400} = 4 \text{ h } \frac{15}{100} = 415 \text{ centièmes d'heure.}$$

TABLEAU D. — PERÇAGE AVEC LUBRIFICATION SOUS PRESSION.

MÉTAL TRAVAILLÉ	OUTIL EN ACIER FONDU		OUTIL EN ARO		OUTIL EN ARS	
	N_0	D_0	N_0	D_0	N_0	D_0
Laiton	400	30	800	50	1 000	65
Bronze 88/12	250	18	620	34	600	40
Fonte grise	160	2	320	5,5	380	8
Acier R = 400 *N/mm²*	120	7,5	220	15	280	19
600 »	50	3	105	7	140	9
800 »	10	0,5	40	2,5	70	4,5
900 »			25	1,2	35	2
1100 »			3	0,2	5	0,25

Avance par tour du foret $a_0 = 0.025$.
Diamètre du foret $d_0 = 25$ *mm*.

N_0 Vitesse de moindre usure en *tr/mn*.
D_0 Débit maximum en *dm³*.

TABLEAU E. — AVANCES MAXIMA PAR TOUR DE FORET.

DIAMÈTRES DES FORETS	FONTE	ACIER DUR	ACIER MI-DUR
1- 5	0,20	0,15	0,10
5-10	0,30	0,20	0,15
10-15	0,40	0,30	0,20
15-25	0,50	0,40	0,25
25-40	0,60	0,45	0,30
40-60	0,70	0,50	0,35

E. — Règles et abaques pour le calcul des vitesses de coupe

Pour simplifier les calculs dont nous avons un aperçu, on utilise, en usine et dans les bureaux de préparation du travail, des règles rectilignes ou circulaires et des abaques

Les *figures* 8 et 9 représentent des règles circulaires pour le calcul des vitesses de coupe de chariotage et de perçage. La détermination des vitesses nécessite la rotation de la réglette médiane circulaire qui porte deux graduations.

On utilise aussi des abaques à échelle métrique (*voir*, page 272, l'abaque établi par M. Renaud, ingénieur de l'E. N. I. A. M. de Paris) ou des abaques à échelle logarithmique, semblables à ceux qui seront donnés, pages 273 à 276.

Les abaques établis à partir des données du commandant Denis ont servi de base à la détermination d'abaques résultant d'observations faites à l'atelier par les sections de préparation du travail.

En principe, on utilisera la vitesse de moindre usure pour les outils d'affûtage long : alésoirs, fraises.

Au contraire, pour les outils courants rapidement affûtés, dont la mise en place est facile, on se fixera une durée moyenne de travail de 1 heure, 1 heure et demie ou 2 heures, entre deux réaffûtages.

Nous donnons ci-après (pages 273 à 276) quatres abaques

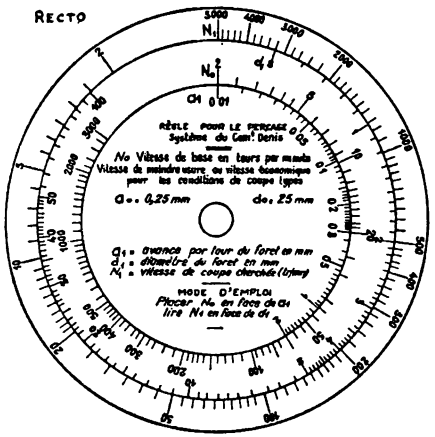
1° Abaque pour les travaux de mortaisage-rabotage ;

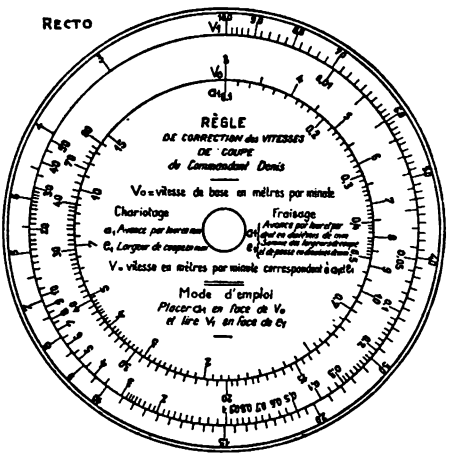
2° Abaque pour le tournage ;

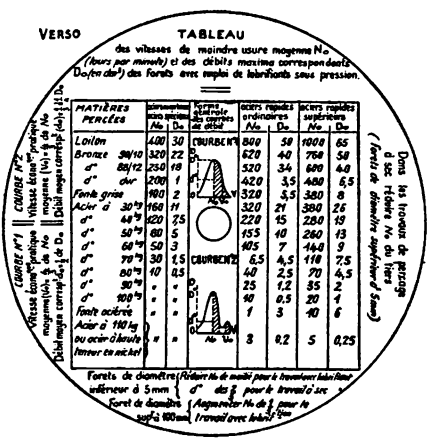
3° Abaque pour le fraisage ;

4° Abaque pour le perçage, l'alésage et le taraudage.

Ces abaques sont à échelle logarithmique, les graduations correspondant aux nombres de la série Renard. Ils donnent des résultats légèrement différents de ceux que l'on obtient en appliquant les travaux du commandant Denis.


RECTO
RÈGLE POUR LE PERÇAGE
Système du Cdt Denis
No Vitesse de base en tours par minute
Vitesse de moindre usure ou vitesse économique
pour les conditions de coupe types
a = 0,25 mm
d = 25 mm
a1 = avance par tour du foret en mm
d1 = diamètre du foret en mm
N1 = vitesse de coupe cherchée (t/mn)
MODE D'EMPLOI
Placer No en face de Ch
lire N1 en face de d1


RECTO
RÈGLE
DE CORRECTION des VITESSES
DE COUPE
du Commandant Denis
Vo = vitesse de base en mètres par minute
Chariotage
Fraisage
V = vitesse en mètres par minute correspondant à ce point
Mode d'emploi
Placer Ch en face de Vo
et lire V1 en face de C1


VERSO
TABLEAU
des vitesses de moindre usure moyennes No
(tours par minute) et des débits maxima correspondants
Do (en cm³) des forets avec emploi de lubrifiants sous pression.
MATIÈRES PERÇÉES
Aciers au carbone et aciers spéciaux
Forme générale des coupes de foret
Aciers rapides ordinaires
Aciers rapides supérieurs
COURBE N°1
COURBE N°2
Dans les travaux de perçage à sec (forets de grande section) prendre environ 0,5 No
Forets de diamètre inférieur à 5 mm
Foret de diamètre supér. à 100 mm

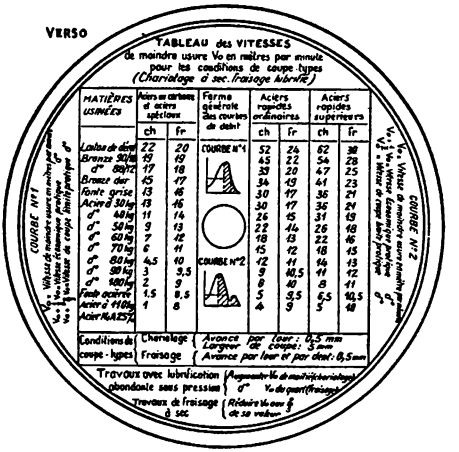


Fig. 8. — Règle pour le calcul des vitesses de coupe de perçage, en tenant compte des données du commandant Denis.

Fig. 9. — Règle pour le calcul des vitesses de coupe de tournage et de fraisage, en tenant compte des données du commandant Denis.

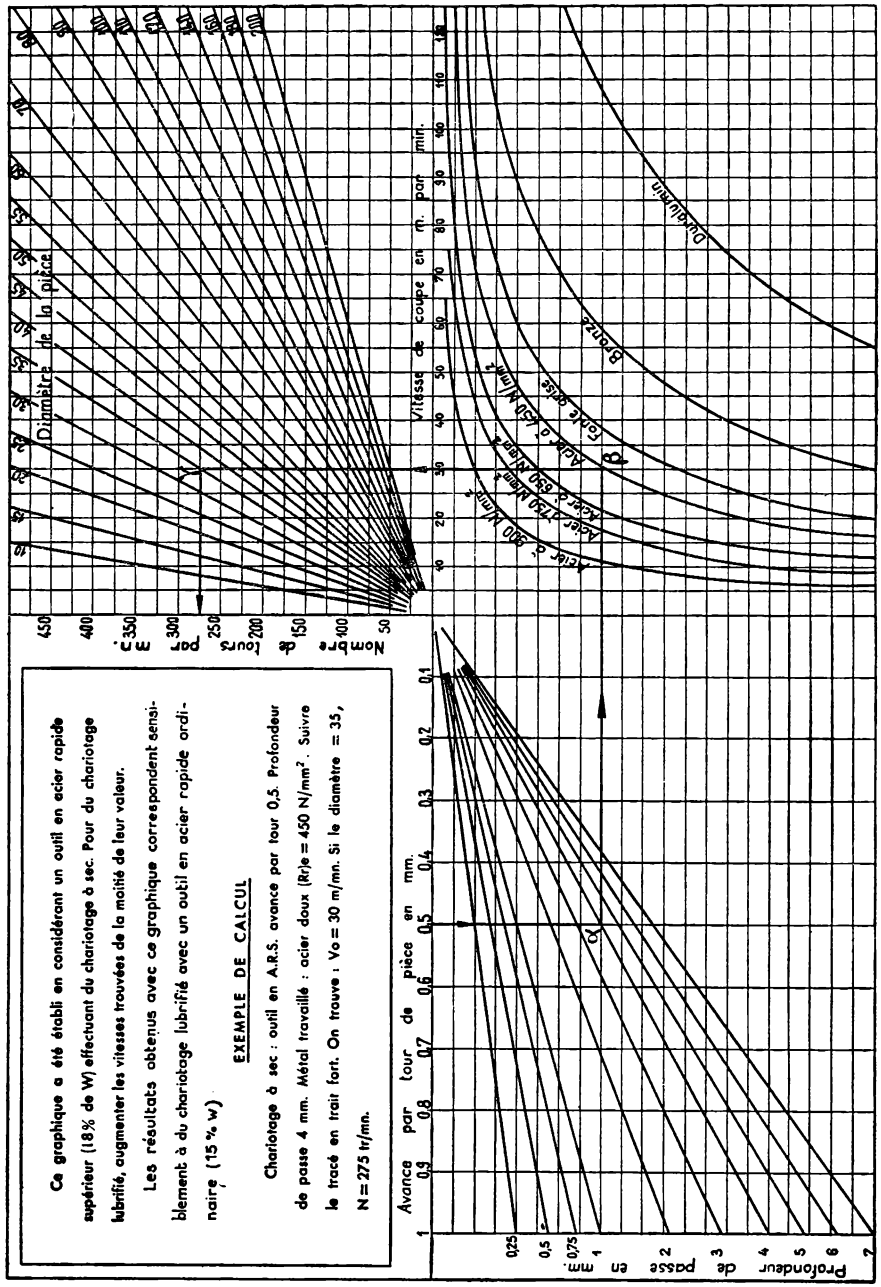

Ce graphique a été établi en considérant un outil en acier rapide supérieur (18% de W) effectuant du chariotage à sec. Pour du chariotage lubrifié, augmenter les vitesses trouvées de la moitié de leur valeur.
Les résultats obtenus avec ce graphique correspondent sensiblement à du chariotage lubrifié avec un outil en acier rapide ordinaire (15 % w)
EXEMPLE DE CALCUL
Chariotage à sec : outil en A.R.S. avance par tour 0,5. Profondeur de passe 4 mm. Métal travaillé : acier doux (Rr)e = 450 N/mm². Suivre le tracé en trait fort. On trouve : Vo = 30 m/mn. Si le diamètre = 35, N = 275 tr/mn.
Diamètre de la pièce
Nombre de tours par mn
Vitesse de coupe en m. par min.
Avance par tour de pièce en mm.
Profondeur de passe en m/m
Acier à 900 N/mm²
Acier à 750 N/mm²
Acier à 650 N/mm²
Acier à 450 N/mm²
Fonte grise
Bronze
Duralumin

Fig. 10. — Abaque permettant le calcul des vitesses de coupe à échelle métrique et conforme aux données du commandant Denis.

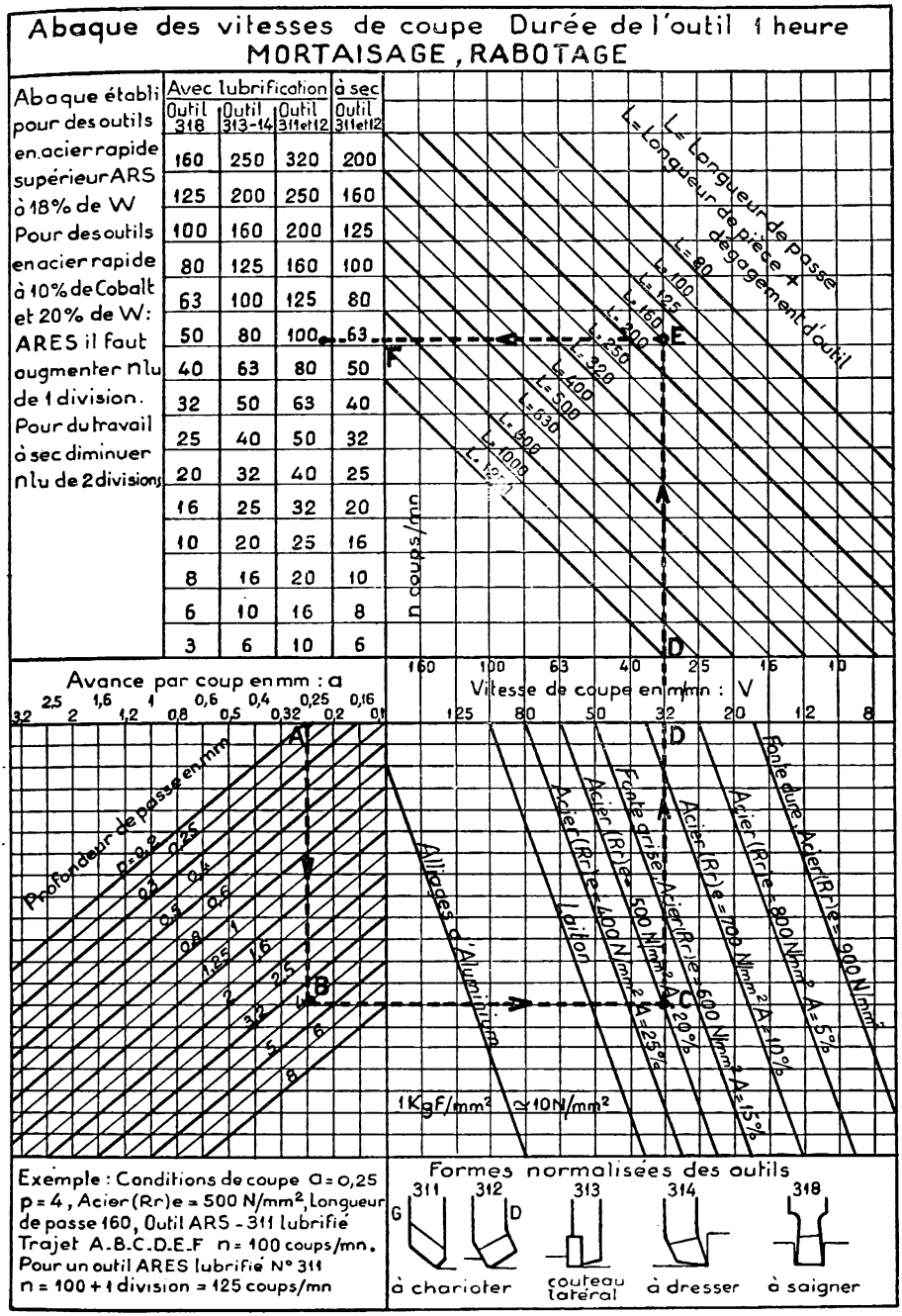
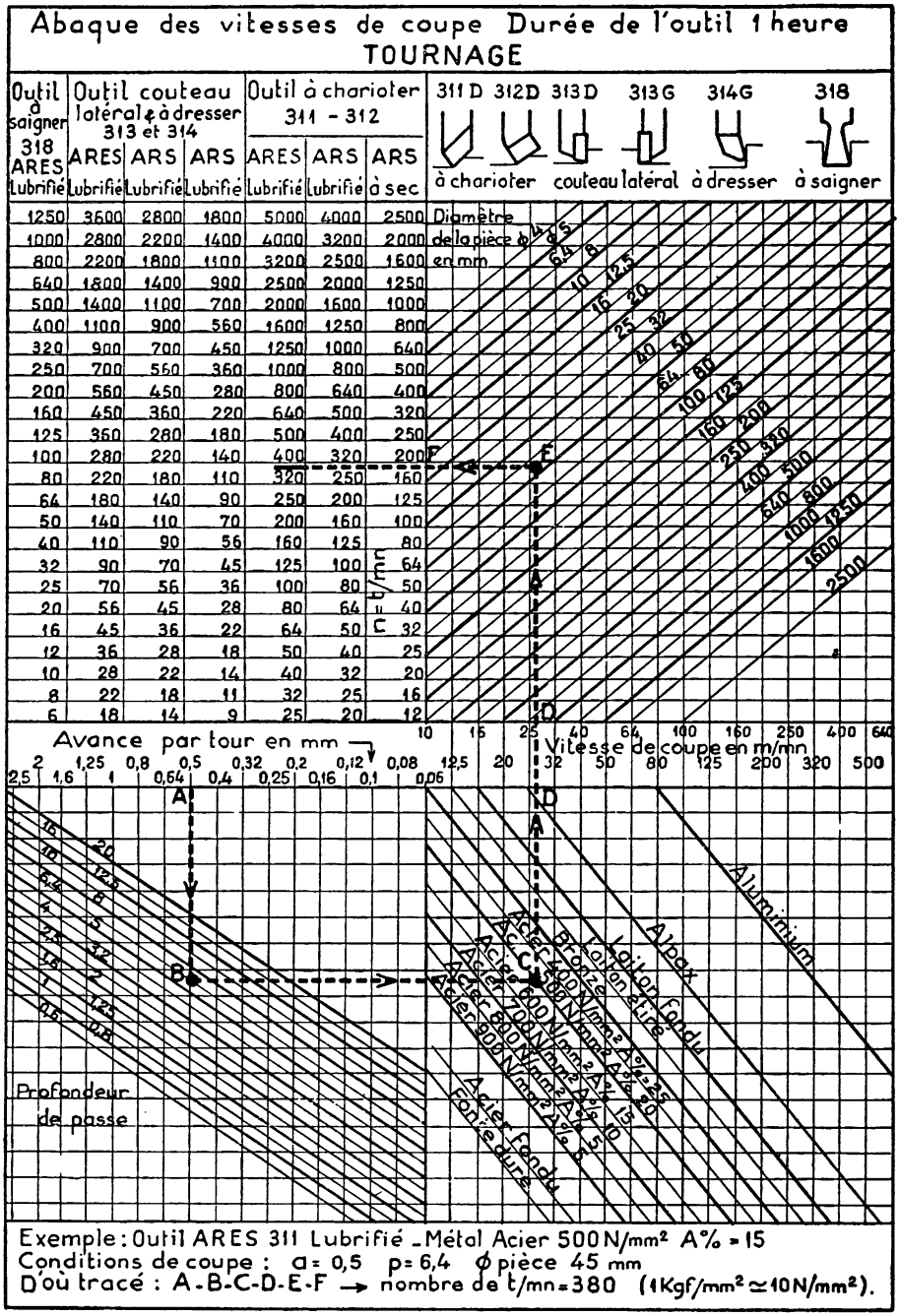

Abaque des vitesses de coupe Durée de l'outil 1 heure
MORTAISAGE, RABOTAGE
Abaque établi pour des outils en acier rapide supérieur ARS à 18% de W
Pour des outils en acier rapide à 10% de Cobalt et 20% de W: ARES il faut augmenter n lu de 1 division.
Pour du travail à sec diminuer n lu de 2 divisions
Avec lubrification
à sec
Outil 318
Outil 313-14
Outil 311 et 12
Outil 311 et 12
160 250 320 200
125 200 250 160
100 160 200 125
80 125 160 100
63 100 125 80
50 80 100 63
40 63 80 50
32 50 63 40
25 40 50 32
20 32 40 25
16 25 32 20
10 20 25 16
8 16 20 10
6 10 16 8
3 6 10 6
L = Longueur de pièce + dégagement d'outil
L=80
L=100
L=125
L=160
L=200
L=250
L=320
L=400
L=500
L=630
L=800
L=1000
L=1250
coups/mn
Avance par coup en mm : a
3,2 2,5 2 1,6 1,2 1 0,8 0,6 0,5 0,4 0,32 0,25 0,2 0,16 0,1
Vitesse de coupe en m/mn : V
160 125 100 80 63 50 40 32 25 20 16 12 10 8
Profondeur de passe en mm
p=8
6
5
4
3,2
2,5
2
1,6
1,25
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,25
Alliages d'Aluminium
Laiton
Acier (Rr)e = 400 N/mm² A = 25%
Fonte grise Acier (Rr)e = 500 N/mm² A = 20%
Acier (Rr)e = 700 N/mm² A = 10%
Fonte dure Acier (Rr)e = 800 N/mm² A = 5%
Acier (Rr)e = 900 N/mm²
1 Kgf/mm² ≃ 10 N/mm²
A
B
C
D
E
F
Exemple : Conditions de coupe a = 0,25
p = 4, Acier (Rr)e = 500 N/mm², Longueur de passe 160, Outil ARS - 311 lubrifié
Trajet A.B.C.D.E.F n = 100 coups/mn.
Pour un outil ARES lubrifié N° 311
n = 100 + 1 division = 125 coups/mn
Formes normalisées des outils
311
312
313
314
318
G
D
à charioter
couteau latéral
à dresser
à saigner

Fig. 11.



Exemple : Outil ARES 311 Lubrifié - Métal Acier 500 N/mm² A% = 15
Conditions de coupe : a = 0,5 p = 6,4 ϕ pièce 45 mm
D'où tracé : A-B-C-D-E-F → nombre de t/mn = 380 (1 Kgf/mm² ≃ 10 N/mm²).

Fig. 12.

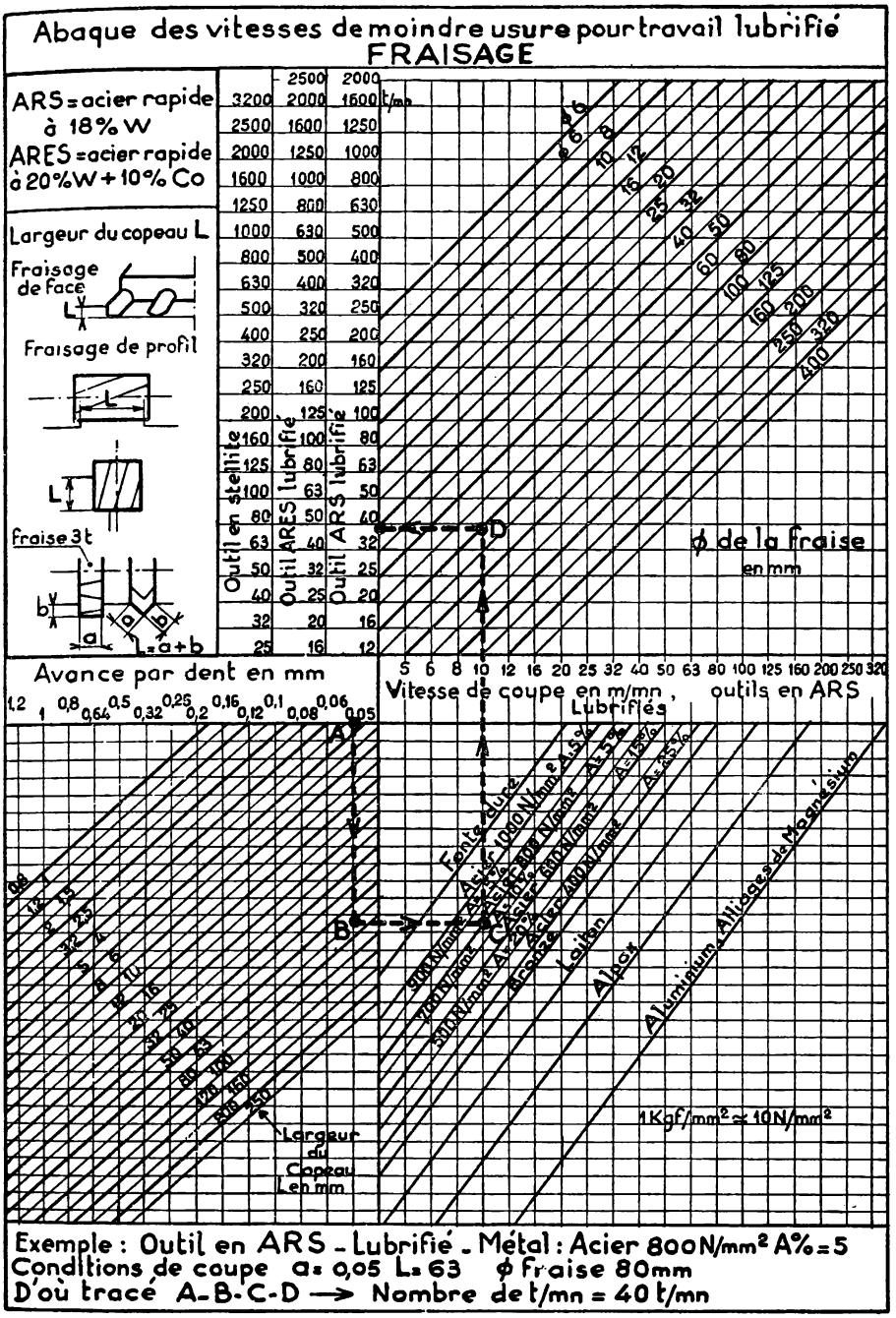
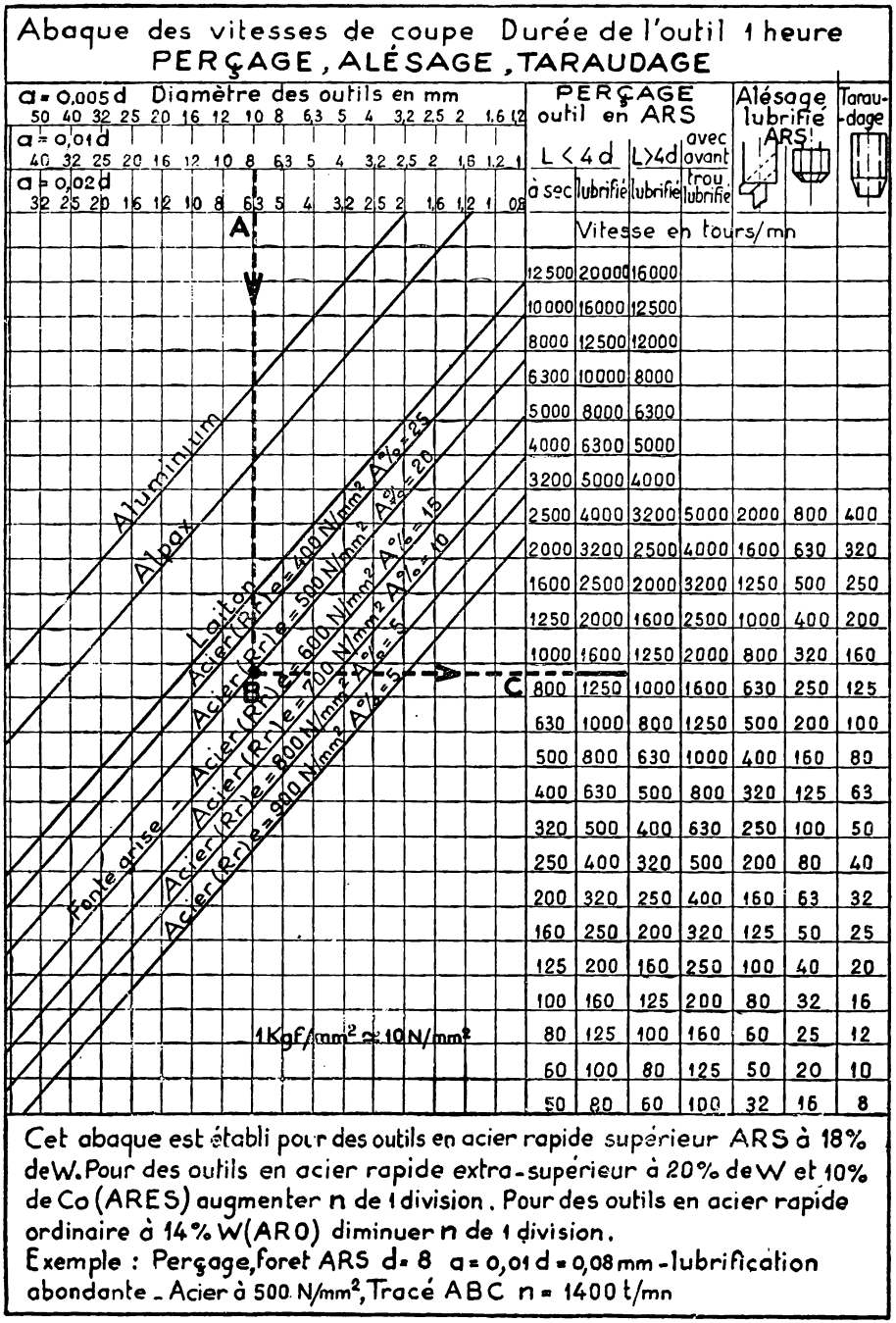

Abaque des vitesses de moindre usure pour travail lubrifié
FRAISAGE
ARS = acier rapide à 18% W
ARES = acier rapide à 20% W + 10% Co
Largeur du copeau L
Fraisage de face
Fraisage de profil
Fraise 3t
L = a + b
Outil en stellite
Outil ARES lubrifié
Outil ARS lubrifié
t/mn
Avance par dent en mm
Vitesse de coupe en m/mn, outils en ARS
Lubrifiés
Fonte dure
Acier 1000 N/mm² A = 5%
Acier 800 N/mm² A = 5%
Acier 600 N/mm² A = 15%
Acier 400 N/mm² A = 25%
Laiton
Alpax
Aluminium Alliages de Magnésium
1 Kgf/mm² ≈ 10 N/mm²
Largeur du Copeau L en mm
ϕ de la fraise en mm
A
B
C
D
Exemple : Outil en ARS - Lubrifié - Métal : Acier 800 N/mm² A% = 5
Conditions de coupe a = 0,05 L = 63 ϕ Fraise 80 mm
D'où tracé A-B-C-D → Nombre de t/mn = 40 t/mn

Fig. 13.



Cet abaque est établi pour des outils en acier rapide supérieur ARS à 18% de W. Pour des outils en acier rapide extra-supérieur à 20% de W et 10% de Co (ARES) augmenter n de 1 division. Pour des outils en acier rapide ordinaire à 14% W (ARO) diminuer n de 1 division.

Exemple : Perçage, foret ARS d = 8 a = 0,01 d = 0,08 mm - lubrification abondante - Acier à 500 N/mm², Tracé ABC n = 1400 t/mn

Fig. 14.

CALCUL DES VITESSES DE COUPE DES OUTILS EN CARBURE

A. — Généralités sur les outils en carbure

Nous rappellerons qu'il existe différents carbures qui sont utilisés pour la fabrication des outils destinés à l'usinage des principaux matériaux employés en construction mécanique ou électrique.

1° Carbures pour le travail de l'acier.

a) *Nuance* S_0.

Carbures de superfinition destinés à remplacer l'outil en diamant. Il sont utilisés avec une vitesse de coupe très élevée et une section de copeau très faible. Ils sont très durs, excessivement fragiles, et doivent produire un copeau continu sans broutement. Ils doivent être *utilisés sur machines modernes* à grande vitesse et en parfait état.

b) *Nuance* S_1.

Carbures pour travaux de finition, utilisés avec une vitesse de coupe élevée et une avance par tour inférieure à 1 mm pour le travail des aciers même les plus durs, comme les aciers à 13 % de manganèse.

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une mauvaise résistance à l'abrasion par la calamine et une assez grande fragilité. On doit donc les employer pour produire un copeau continu, sans contact avec les surfaces brutes, sur des machines modernes en parfait état mécanique.

c) *Nuance* S_2.

Carbures pour travaux d'ébauche. Ces carbures doivent être utilisés à vitesse moyenne et peuvent supporter des avances importantes par tour. Leur dureté et leur résistance à l'échauffement n'étant pas très importantes, ils ne peuvent être utilisés pour le travail des métaux très durs, comme les aciers au manganèse. Comme ils sont peu fragiles, on les emploie pour l'ébauche des pièces avec extérieur calaminé et où l'usinage comporte des discontinuités ou des défauts de surface.

Pour employer ces carbures, il n'est pas utile de posséder des machines-outils modernes, mais seulement des machines de conception ancienne, en bon état mécanique.

d) *Nuance* S_3.

Carbures pour travaux d'ébauche avec chocs. Ces carbures sont tenaces et peuvent supporter de fortes passes et même des chocs.

Par contre, leur dureté étant faible, ils ne pourront être employés pour l'usinage des aciers dont la résistance est supérieure à 1 100 N/mm².

Ce sont donc des carbures réservés au gros dégrossissage sur machines-outils de qualité moyenne : tours, fraiseuses, aléseuses et même raboteuses ou étaux-limeurs.

2° Carbures pour le travail des fontes, bronzes et matières non métalliques.

a) *Nuance* H_1.

Carbures pour l'usinage de la fonte douce, cuivre, bronze, laitons, métaux légers.

b) *Nuance* H_2.

Carbures pour l'usinage des fontes trempées les plus dures.

c) *Nuance* G_1.

Carbures pour l'usinage de fontes dures (dureté Brinell $\triangle > 200$), verre, porcelaine, pierres.

B. — Conditions de coupe des carbures métalliques

Il n'a pas été fait d'étude systématique concernant la détermination des vitesses de coupe pour les outils en carbure. Il est certain qu'il existe, pour un travail déterminé, une vitesse de moindre usure, et il est vraisemblable que la loi du débit constant peut être vérifiée.

Une étude intéressante, présentée sur le journal *l'Usine* par M. Combes, ingénieur aux Aciéries de la Marine et d'Homécourt, a été traduite en abaques utilisés dans de nombreuses usines. Nous donnerons plus loin un extrait de ces travaux.

Les règles suivantes sont généralement admises :

a) *Il existe, pour chaque carbure et pour chaque métal travaillé, des vitesses maxima et minima qui constituent les vitesses limites pratiques d'utilisation.*

b) *Il ne faut pas descendre au-dessous des vitesses minima indiquées. A ce moment, l'outil arrache et s'use très vite, tandis que la pièce devient rugueuse.*

c) *Il faut conserver une vitesse constante à la pièce pendant le travail, car toute variation de vitesse résultant d'un glissement de courroie ou d'un manque de puissance a pour résultat l'usure rapide ou même la destruction de l'outil.*

d) *Étant donnees les grandes vitesses de travail, pour ne pas absorber une puissance supérieure à celle de la machine, la section maximum du copeau doit être relativement faible.*

On a, en effet :

$$P = K \cdot (R_r)_e \times S \times V \times \rho$$

- P, puissance absorbée par la coupe ;
- $(R_r)_e$, résistance à la rupture en N/mm^2 ;
- S, section du copeau en mm^2 ;
- V, vitesse de coupe en m/mn ;
- ρ, rendement du tour.

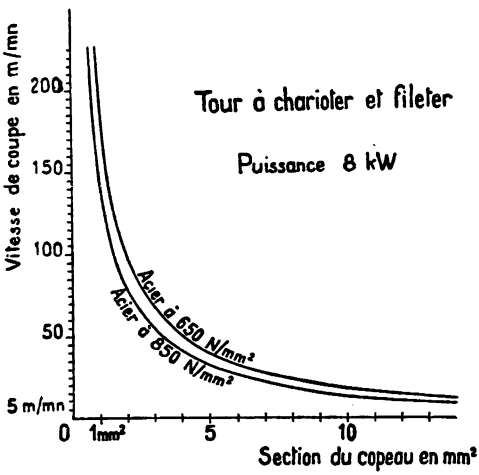


Fig. 15. — Variations de la vitesse de coupe en fonction de la section du copeau, le tour travaillant à puissance constante.

Il est intéressant de connaître, pour chaque machine, les sections de copeaux correspondant à l'utilisation du moteur à sa puissance maximum. Il suffit de déterminer expérimentalement la variation de la section du copeau, S mm², en fonction de la vitesse de coupe V en m/mn. Pour cela, on branche, sur le circuit électrique du moteur, un ampèremètre qui permet de contrôler, avec assez de précision, la puissance par la mesure de l'intensité absorbée. L'outil travaillant à une vitesse de coupe déterminée, on modifie la section du copeau en modifiant l'avance par tour ou la profondeur de passe, jusqu'à ce que l'aiguille de l'ampèremètre atteigne la graduation correspondant à la puissance nominale du moteur. On obtient une courbe qui est sensiblement une hyperbole (voir *fig.* 15).

Pour calculer la section de copeau admissible, on peut utiliser la formule suivante :

$$\text{Section du copeau en mm}^2 = 2 \times \frac{\text{Masse de copeau en kg/h}}{\text{Vit. de coupe en m/mn}}.$$

Dans l'acier demi-dur $(R_r)_e = 620$ N/mm², on peut admettre, sur un tour moderne, un débit de 10 à 12 kg de copeaux à l'heure et par cheval de puissance nominale du moteur.

EXEMPLE.

On chariote, à la vitesse de 200 m/mn, de l'acier demi-dur sur un tour dont le moteur a une puissance de 5 ch.

La section maximum de copeaux est : $S = 2 \times \frac{10 \times 5}{200} = 0{,}5 \text{ mm}^2$.

On peut également, pour déterminer les sections maxima de copeaux dans le cas du tournage et du rabotage, utiliser l'abaque de la *figure* 16, établi par

M. Delb et qui donne des résultats inférieurs à ceux trouvés précédemment, car l'auteur a pris de larges coefficients de sécurité. Ainsi, pour résoudre le problème précédent, il suffit de suivre le tracé ABCD et on trouve S = 0,32 mm².

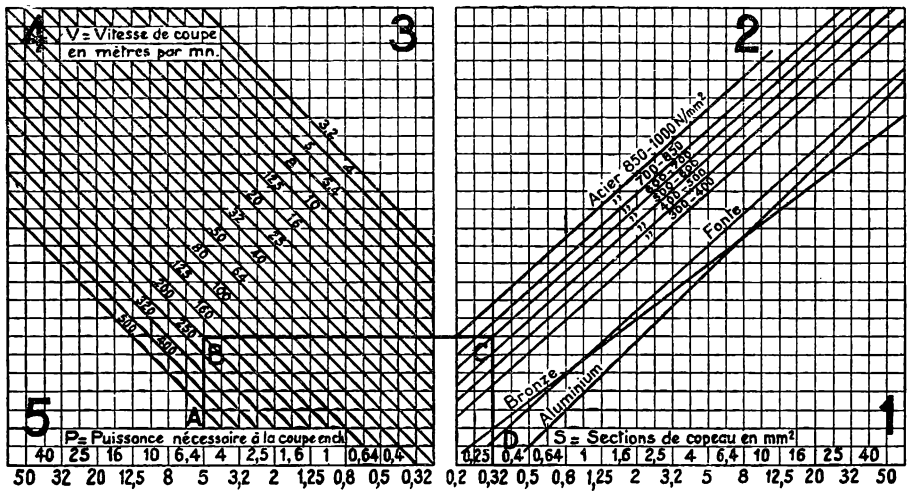


Fig. 16. — **Tournage-Rabotage.** Puissance nécessaire à la coupe ; section maximum du copeau.

C. — Choix de la vitesse de coupe et des dimensions maxima du copeau

Les *figures* 17, 18, 19 et 20 reproduisent les abaques dressés par M. Combes pour l'utilisation des différents carbures.

Chaque abaque comporte, en haut et à droite, un tableau donnant les vitesses limites à utiliser en fonction des caractéristiques du métal travaillé. Sur la *figure* 17, abaque concernant les carbures nuance S_1, pour une avance < 0,6 mm et lorsqu'on travaille de l'acier $(R_r)_e$ = 800 N/mm², les vitesses limites sont 210 et 130 m/mn.

Choisissons, comme il est conseillé, une vitesse voisine du maximum, soit 200 m/mn.

Nous traçons, à partir de V = 200 m/mn, une verticale arrêtée sur l'oblique $(R_r)_e$ = 800 N/mm², puis, par ce point, une horizontale qui coupe la verticale issue de a = 0,25 sensiblement sur l'oblique p = 2,5.

La section du copeau est alors de : 2,5 × 0,25 = 0,625 mm² et, sur l'abaque *figure* 16, nous trouvons, comme puissance du moteur du tour, 12 ch environ.

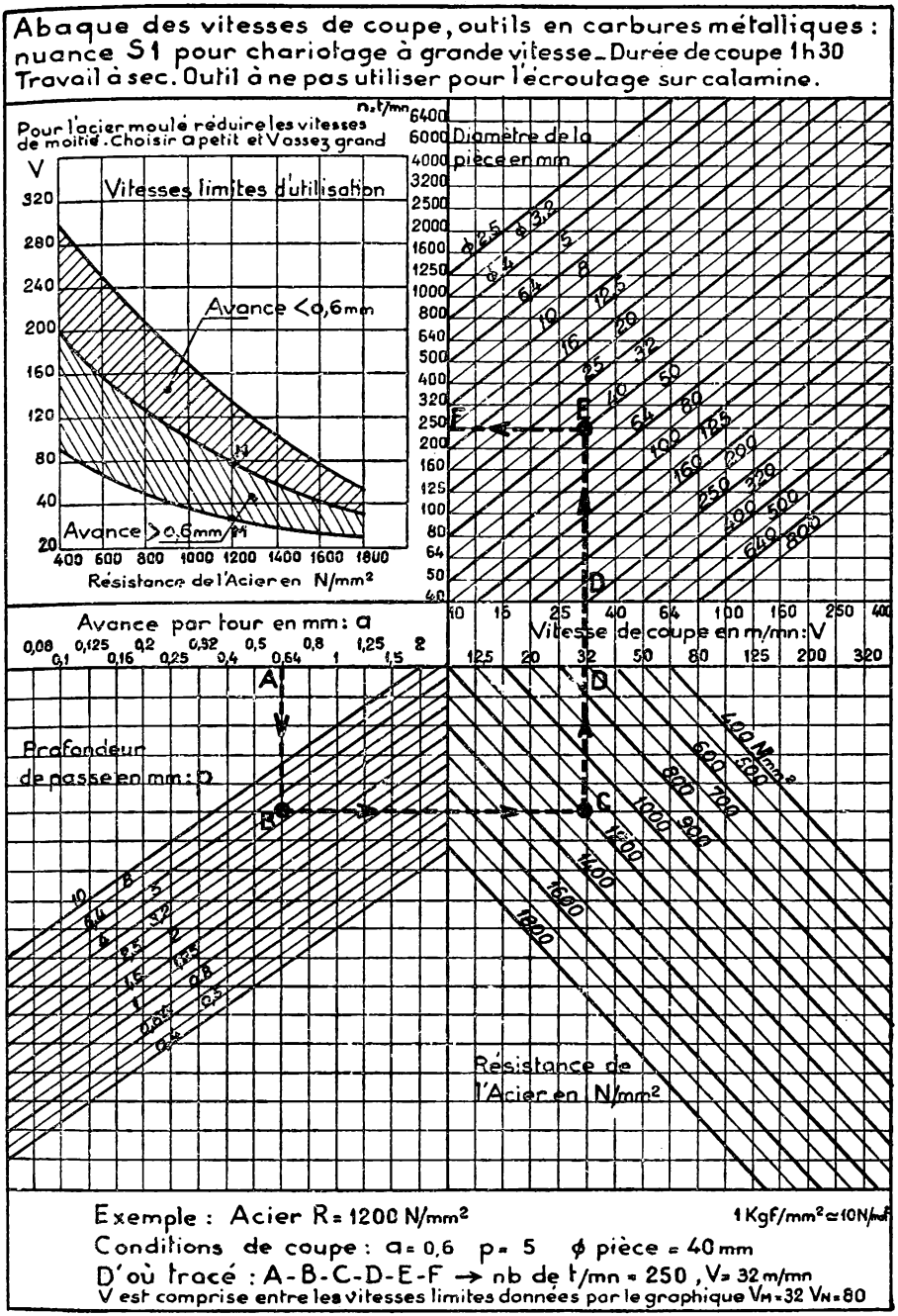

Abaque des vitesses de coupe, outils en carbures métalliques : nuance S1 pour chariotage à grande vitesse_Durée de coupe 1h30 Travail à sec. Outil à ne pas utiliser pour l'écroutage sur calamine.
Pour l'acier moulé réduire les vitesses de moitié. Choisir a petit et V assez grand
n.t/mn
V
Vitesses limites d'utilisation
Avance < 0,6 mm
Avance > 0,6 mm
Résistance de l'Acier en N/mm²
Diamètre de la pièce en mm
Avance par tour en mm : a
Vitesse de coupe en m/mn : V
Profondeur de passe en mm : D
Résistance de l'Acier en N/mm²
Exemple : Acier R = 1200 N/mm²
1 Kgf/mm² ≃ 10N/mm²
Conditions de coupe : a = 0,6 p = 5 ϕ pièce = 40 mm
D'où tracé : A-B-C-D-E-F → nb de t/mn = 250 , V = 32 m/mn
V est comprise entre les vitesses limites données par le graphique VM = 32 VN = 80

Fig. 17.

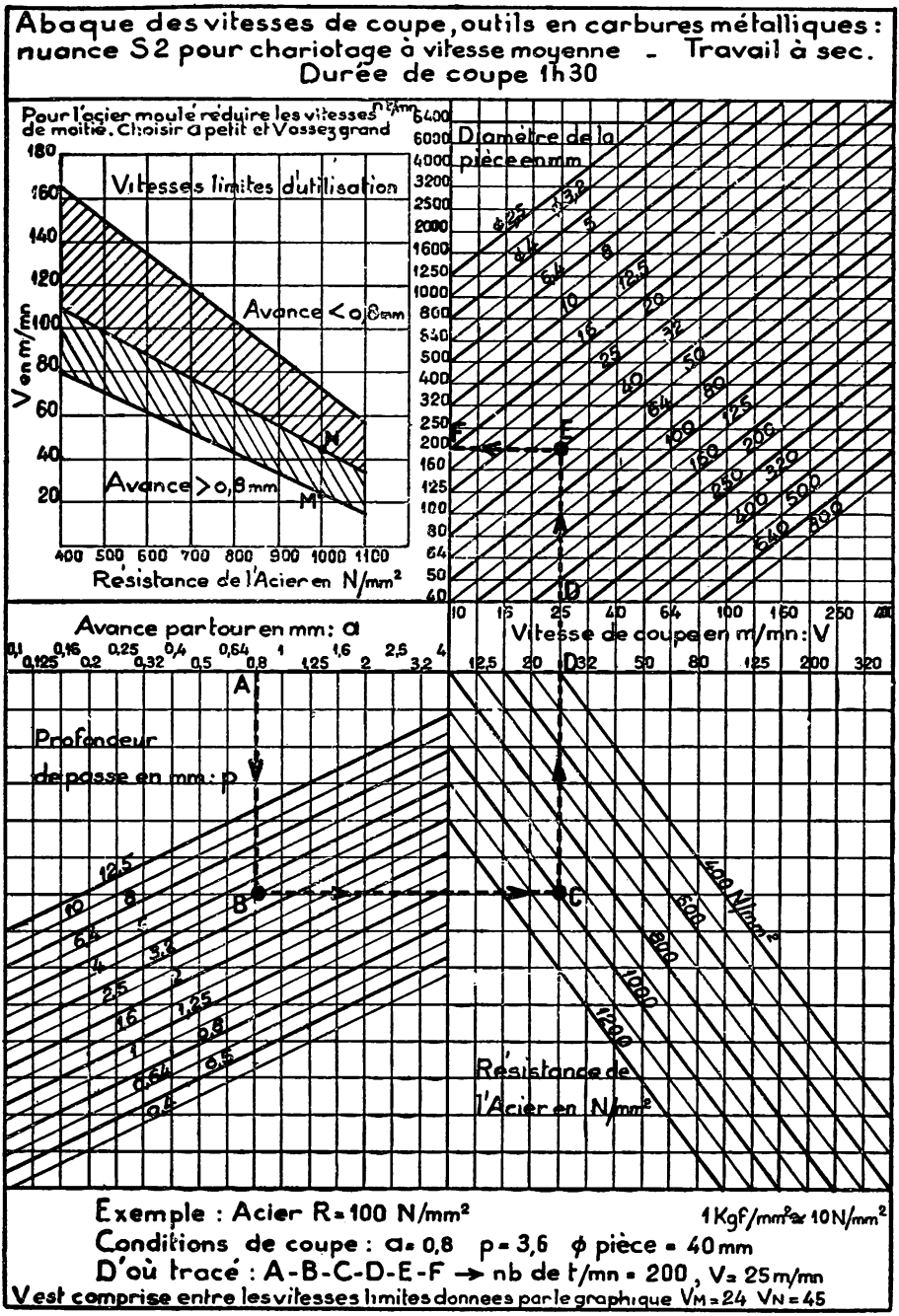

Abaque des vitesses de coupe, outils en carbures métalliques : nuance S2 pour chariotage à vitesse moyenne - Travail à sec. Durée de coupe 1h30
Pour l'acier moulé réduire les vitesses de moitié. Choisir a petit et V assez grand
Vitesses limites d'utilisation
Avance < 0,8 mm
Avance > 0,8 mm
V en m/mn
Résistance de l'Acier en N/mm²
Diamètre de la pièce en mm
Avance par tour en mm : a
Vitesse de coupe en m/mn : V
Profondeur de passe en mm : p
Résistance de l'Acier en N/mm²
Exemple : Acier R = 100 N/mm²
1 Kgf/mm² ≈ 10 N/mm²
Conditions de coupe : a = 0,8 p = 3,6 ϕ pièce = 40 mm
D'où tracé : A-B-C-D-E-F → nb de t/mn = 200, V = 25 m/mn
V est comprise entre les vitesses limites données par le graphique VM = 24 VN = 45

Fig. 18.

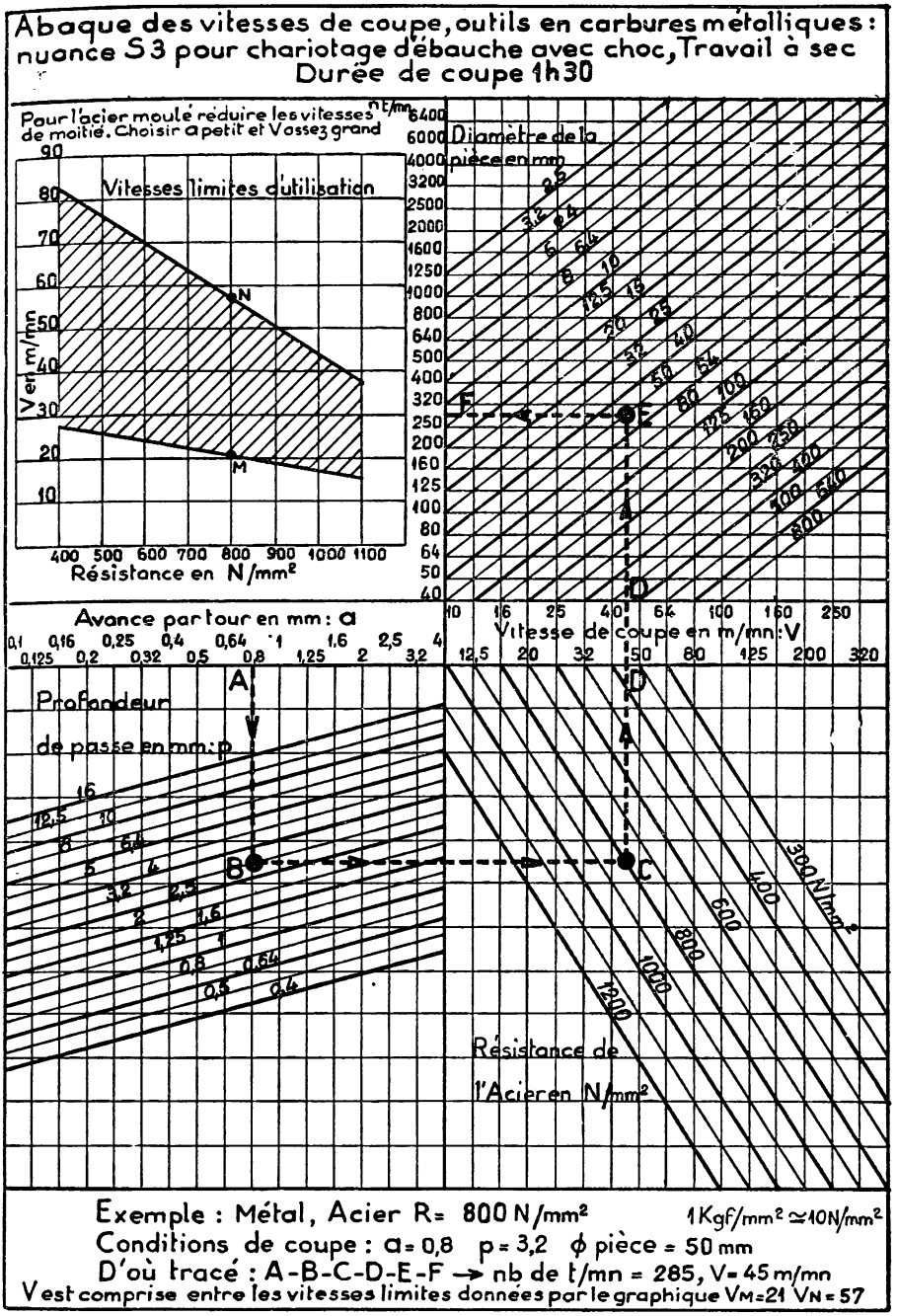

Abaque des vitesses de coupe, outils en carbures métalliques : nuance S3 pour chariotage d'ébauche avec choc, Travail à sec
Durée de coupe 1h30
Pour l'acier moulé réduire les vitesses de moitié. Choisir a petit et V assez grand
Vitesses limites d'utilisation
Ver m/mn
Résistance en N/mm²
400 500 600 700 800 900 1000 1100
N
M
n t/mn
Diamètre de la pièce en mm
Avance par tour en mm : a
0,1 0,16 0,25 0,4 0,64 1 1,6 2,5 4
0,125 0,2 0,32 0,5 0,8 1,25 2 3,2
Profondeur de passe en mm : p
Vitesse de coupe en m/mn : V
10 16 25 40 64 100 160 250
12,5 20 32 50 80 125 200 320
A
B
C
D
E
F
Résistance de l'Acier en N/mm²
300 N/mm²
400
600
800
1000
1200
Exemple : Métal, Acier R = 800 N/mm²
1 Kgf/mm² ≃ 10 N/mm²
Conditions de coupe : a = 0,8 p = 3,2 ϕ pièce = 50 mm
D'où tracé : A-B-C-D-E-F → nb de t/mn = 285, V = 45 m/mn
V est comprise entre les vitesses limites données par le graphique VM = 21 VN = 57

Fig. 19.

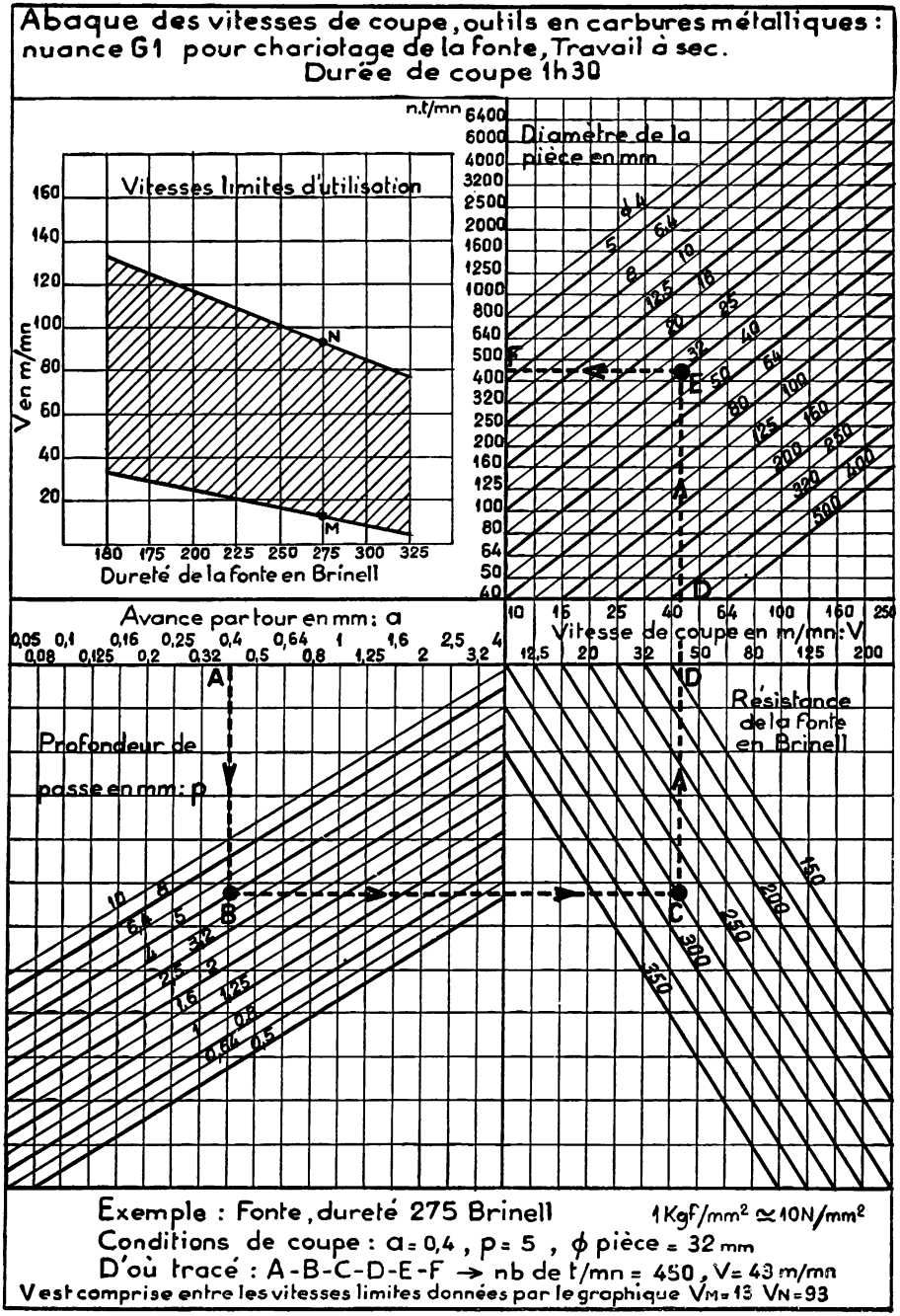

Abaque des vitesses de coupe, outils en carbures métalliques :
nuance G1 pour chariotage de la fonte, Travail à sec.
Durée de coupe 1h30
n.t/mn
Vitesses limites d'utilisation
V en m/mn
Dureté de la fonte en Brinell
Diamètre de la pièce en mm
Avance par tour en mm : a
Vitesse de coupe en m/mn : V
Profondeur de passe en mm : p
Résistance de la fonte en Brinell
Exemple : Fonte, dureté 275 Brinell
1 Kgf/mm² ≃ 10 N/mm²
Conditions de coupe : a = 0,4 , p = 5 , ϕ pièce = 32 mm
D'où tracé : A-B-C-D-E-F → nb de t/mn = 450 , V = 43 m/mn
V est comprise entre les vitesses limites données par le graphique VM = 13 VN = 93

Fig. 20.

REMARQUE.

Il est possible d'utiliser ces abaques pour déterminer la vitesse de coupe en partant de la résistance du métal et des dimensions du copeau. Il faut que la vitesse trouvée soit comprise entre les limites admissibles.

Exemple. — Soit un outil nuance S_1 travaillant de l'acier

$$(R_r)_e = 800 \text{ N/mm}^2.$$

Les limites admissibles pour la vitesse sont 130 et 210 m/mn.

a) Supposons $a = 0{,}1$ mm et $e = 2$ mm.

On trouve : $V = 380$ m/mn.

Chiffre trop important. On prendra la valeur maximum prévue pour V, soit 210 m/mn.

b) Supposons $a = 0{,}5$ mm et $e = 4$ mm, avec $(R_r)_e = 800$ N/mm².

On trouve : $V = 100$ m/mn.

Valeur trop faible. Il faudra, si l'on veut conserver la profondeur de passe $e = 4$ mm, prendre une avance de 0,32 mm à laquelle correspond une vitesse de 140 m/mn.

D. — Conseils concernant l'utilisation des outils en carbure

1° Choix des nuances.

a) *Métaux ferreux.*

Si l'outil est inutilisable par suite de l'usure exagérée de la face d'attaque ou le long de l'arête tranchante, choisir une nuance d'indice plus élevé.

Remplacer S_0 par S_1, S_1 par S_2, S_2 par S_3.

Si l'outil est inutilisable par suite de l'écaillage du bord d'attaque, choisir une nuance d'indice plus faible.

Remplacer S_3 par S_2, S_2 par S_1, S_1 par S_0.

b) *Métaux non ferreux.*

Si l'outil est inutilisable par suite de l'usure excessive de la face d'attaque ou le long de l'arête tranchante, remplacer H_1 par H_2 et G_1 par H_1.

Si l'outil s'écaille ou se casse, remplacer H_2 par H_1 et H_1 par G_1.

2° Relation vitesse-avance.

Si l'outil présente un bord d'attaque recouvert de métal, augmenter la vitesse de coupe.

Si l'outil présente une usure exagérée de l'arête de coupe, diminuer la vitesse de coupe.

Si l'outil présente une usure exagérée du bord d'attaque, augmenter l'avance.

Si l'outil présente une usure exagérée de la face d'attaque (cratère apparent), diminuer l'avance.

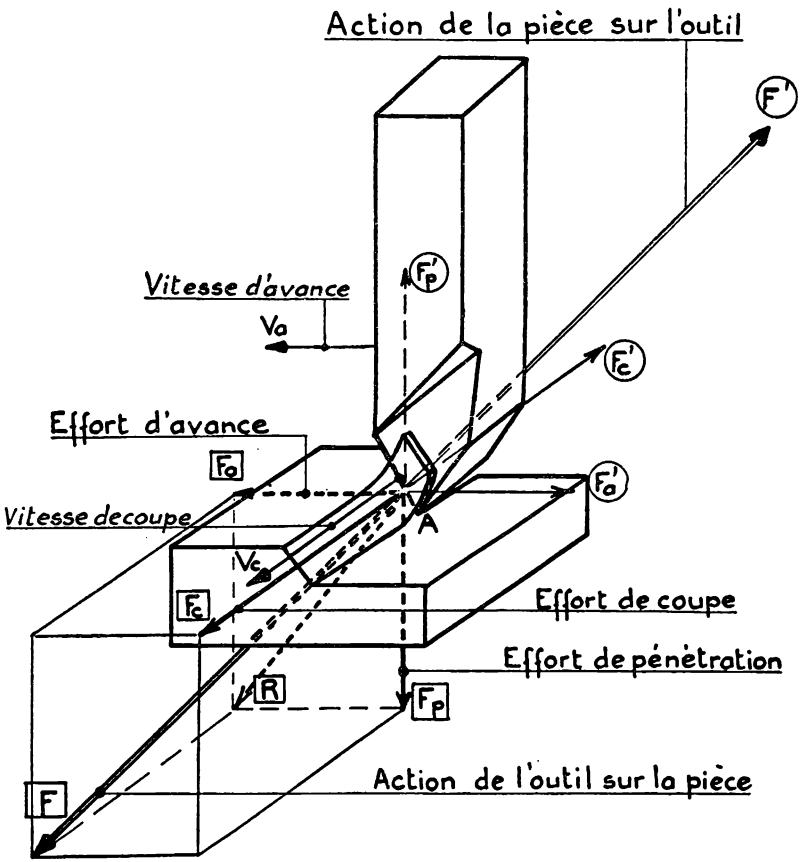


Fig. 1. — Action de l'outil sur la pièce ; ses composantes.
Action de la pièce sur l'outil ; ses composantes.

Actions mutuelles
résultant de la coupe du métal

La coupe du métal suppose la pénétration de l'outil dans la pièce et le mouvement relatif de la pièce par rapport à l'outil.

Au contact de la pièce et de l'outil, des actions de contact prennent naissance sur la face d'attaque (voir *fig.* 1, ci-contre).

Les *actions de l'outil sur la pièce* admettent une résultante $\vec{F}$.

Les *actions de la pièce sur l'outil* admettent une résultante $\vec{F'}$ qui est une force égale et directement opposée à $\vec{F}$.

Les forces $\vec{F}$ et $\vec{F'}$ sont les *actions mutuelles résultant de la coupe du métal.*

Pour définir ces actions, on a mesuré expérimentalement leurs composantes suivant trois directions perpendiculaires :

— la *première* est parallèle au vecteur vitesse de coupe V_c ;

— la *seconde* est parallèle au vecteur vitesse du mouvement d'avance V_a qui, sur les machines-outils, est perpendiculaire au vecteur vitesse de coupe ;

— la *troisième* est normale à la surface usinée, donc parallèle au vecteur vitesse du mouvement de pénétration, dans le cas du travail à l'outil de forme.

Les composantes de l'action $\vec{F}$ de l'outil sur la pièce sont :

$\vec{F_c}$, appelée *effort de coupe*, parallèle au vecteur vitesse de coupe V_c ;

$\vec{F_a}$, appelée *effort d'avance*, parallèle au vecteur vitesse d'avance V_a ;

$\vec{F_p}$, appelée *effort de pénétration*, normale à la surface usinée.

Les composantes correspondantes de l'action $\vec{F'}$ de la pièce sur l'outil : $\vec{F'_c}$, $\vec{F'_a}$, $\vec{F'_p}$, sont égales et directement opposées à $\vec{F_c}$, $\vec{F_a}$, $\vec{F_p}$. Elles sont désignées de la même façon.

1° Valeur des composantes des actions mutuelles dues à la coupe.

On détermine la valeur des composantes des actions mutuelles à l'aide de supports d'outils dynamométriques.

Les efforts dus à la coupe sont essentiellement variables dans le temps : nous avons eu l'occasion de le voir quand nous avons étudié la formation du copeau (tome 1). Nous n'étudierons ici que les **valeurs maxima** des actions mutuelles et de leurs composantes.

a) *Effort de coupe* F_c.

A titre d'exemple, nous avons représenté, sur la *figure* 2, le schéma de principe d'un dispositif permettant la mesure de l'effort de coupe F_c. Le dynamomètre à anneau fendu se déforme sous l'action de l'outil. La déformation est mesurée à l'aide d'un micromètre pneumatique Solex dont la réglette est graduée, en newtons ou en kilogrammes-force, après étalonnage.

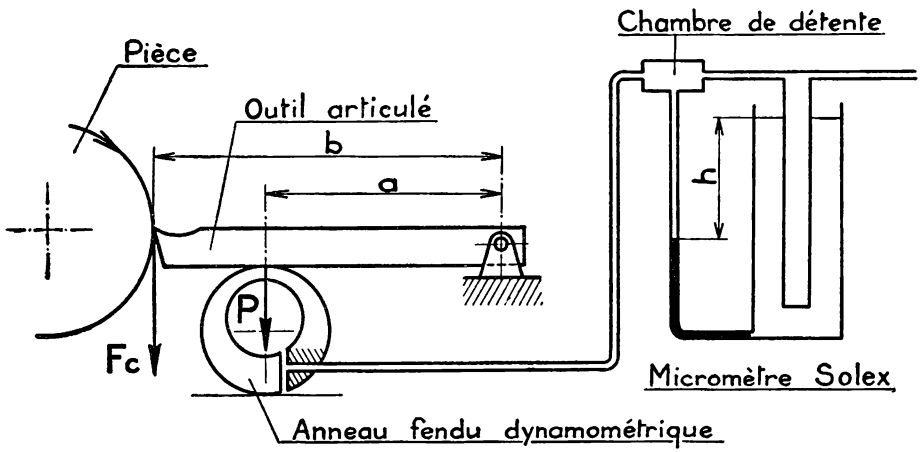


Fig. 2. — Mesure de l'effort de coupe F_c.

On a :

$$F_c = P \cdot \frac{a}{b}.$$

Les différents essais ont montré que l'effort de coupe F_c est plus important que F_a et F_p. La valeur trouvée pour F_c est proportionnelle à la section du copeau.

On a :

$$F_c = K \cdot S.$$

F_c est l'*effort de coupe* en newtons ;

S est la *section du copeau* en millimètres carrés ;

K est un coefficient, appelé *résistance spécifique à la coupe*, en newtons par millimètre carré.

La valeur de K varie avec la nature du métal travaillé, la forme de l'outil, la qualité de l'affûtage et les conditions d'arrosage.

On peut admettre, en première approximation, que K est proportionnel à la résistance à la rupture (à l'extension) du métal et que l'on a :

$K = 3$ à 4 $(R_r)_e$ pour les aciers ;
$K = 4$ à 5 $(R_r)_e$ pour les fontes.

L'effort de coupe F_c varie peu avec le type d'outil utilisé.

Les valeurs moyennes du coefficient de résistance spécifique à la coup. sont les suivantes :

Fonte douce	$K = 500$ à 750 N/mm²
Fonte dure	$K = 1\,150$ à $1\,400$ N/mm²
Acier laminé $(R_r)_e = 400$ N/mm²	$K = 1\,500$ à $1\,600$ N/mm²
Acier laminé $(R_r)_e = 800$ N/mm²	$K = 2\,200$ à $2\,500$ N/mm²
Acier coulé	$K = 1\,200$ à $1\,600$ N/mm²
Bronze	$K = 500$ à $1\,000$ N/mm²

REMARQUES.

Le coefficient K augmente lorsque l'épaisseur du copeau est faible et lorsque la vitesse de coupe diminue exagérément. Il diminue quand la pente d'affûtage augmente. Les valeurs de K, données plus haut, ne sont que des *valeurs moyennes* pour des conditions normales de travail.

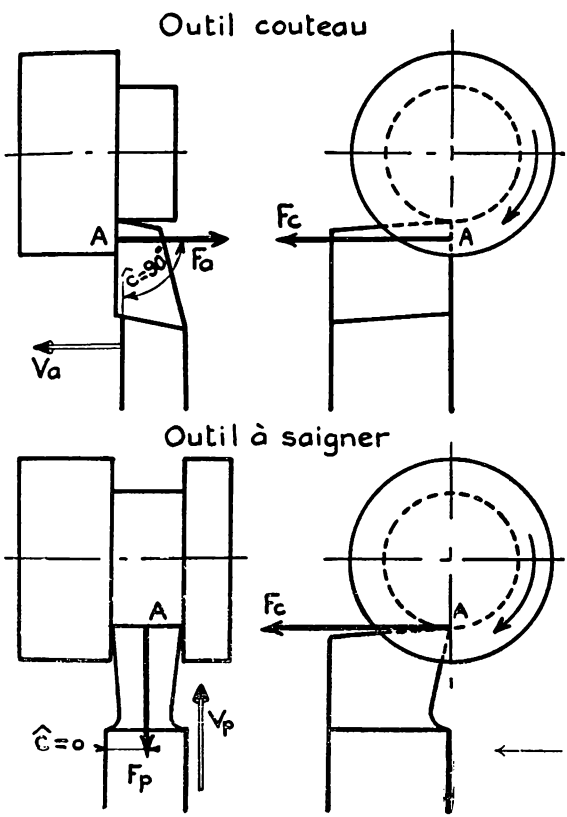


Fig. 3. — Les composantes de l'effort de coupe dans le cas d'emploi de l'outil couteau et de l'outil à saigner.

b) *Effort d'avance F_a et effort de pénétration F_p.*

Les essais ont montré que les efforts F_a et F_p sont, eux aussi, proportionnels à la section du copeau et à la résistance spécifique de coupe. Par suite, F_a et F_p sont proportionnels à l'effort de coupe F_c. Les valeurs de F_a et F_p dépendent de l'angle de direction de l'outil.

Pour les outils couteaux à arête normale, où l'angle de direction $\widehat{c} = 90°$, l'effort de pénétration F_p est sensiblement nul (voir *fig.* 3).

Pour les outils à saigner ou les outils pelles à arête normale, l'angle de direction $\widehat{c} = 0$ et l'effort d'avance $F_a = 0$.

Les différents essais ont donné les résultats moyens suivants :

Type d'outil	Métal travaillé	F_a	F_p
Outil à charioter ..... angle de direction $\widehat{c} = 45°$	Fonte Aciers	1/3 F_c 2/5 F_c	1/3 F_c 2/5 F_c
Outil à charioter ..... angle de direction $\widehat{c} = 30°$	Fonte Aciers	1/4 F_c 1/3 F_c	1/3 F_c 1/2 F_c
Outil couteau	Fonte Aciers	2/3 F_c	sensiblement nul
Outil pelle	Fonte Aciers	sensiblement nul	2/3 F_c

Pour le calcul des machines-outils, on admet souvent que la résultante R de F_a et F_p est parallèle à la projection, sur le plan de base, de la droite de plus grande pente de la face d'attaque. Pour les outils à arête normale, R est supposée normale à l'arête tranchante et située dans le plan perpendiculaire au vecteur vitesse de coupe V_c.

On prend, pour R, une valeur égale à la valeur F_c. On a ainsi un coefficient de sécurité de 1,5 à 1,8 pour le calcul des éléments de machine et, notamment, du support d'outil et du support de pièce.

Sur la *figure* 4, nous avons représenté un outil à charioter, utilisé pour cylindrer une pièce. Sur la *vue* A, les composantes de l'action de l'outil sur la pièce ont seules été tracées et, sur la *vue* B, les composantes de l'action de la pièce sur l'outil.

On a :

$$\text{section du copeau : } S = a \cdot p$$

$$F_c = K \cdot S$$

$$R \simeq F_c$$

$$F_a \simeq R \sin \widehat{c} \simeq F_c \sin \widehat{c}$$

$$F_p \simeq R \cos \widehat{c} \simeq F_c \cos \widehat{c}.$$

Application numérique.

Calculer l'effort de coupe correspondant au tournage d'une pièce en acier $(R_r)_e = 700$ N/mm². *Avance par tour* : 0,5 mm. *Profondeur de passe* : 4 mm.

Résistance spécifique à la coupe : on prendra $K = 3\ (R_r)_e$.

$$K = 3 \times 700 = 2\,100 \text{ N/mm}^2.$$

Section du copeau :

$$S = 0{,}5 \times 4 = 2 \text{ mm}^2.$$

Effort de coupe :

$$F_c = 2\,100 \times 2 = 4\,200 \text{ N.}$$

Si l'outil à charioter a un angle de direction $\widehat{c} = 60^o$,

$$F_a \simeq F_c \sin 60^o$$
$$\simeq 4\,200 \times 0{,}86 \simeq 3\,600 \text{ N.}$$
$$F_p \simeq F_c \cos 60^o$$
$$\simeq 4\,200 \times 0{,}5 = 2\,100 \text{ N.}$$

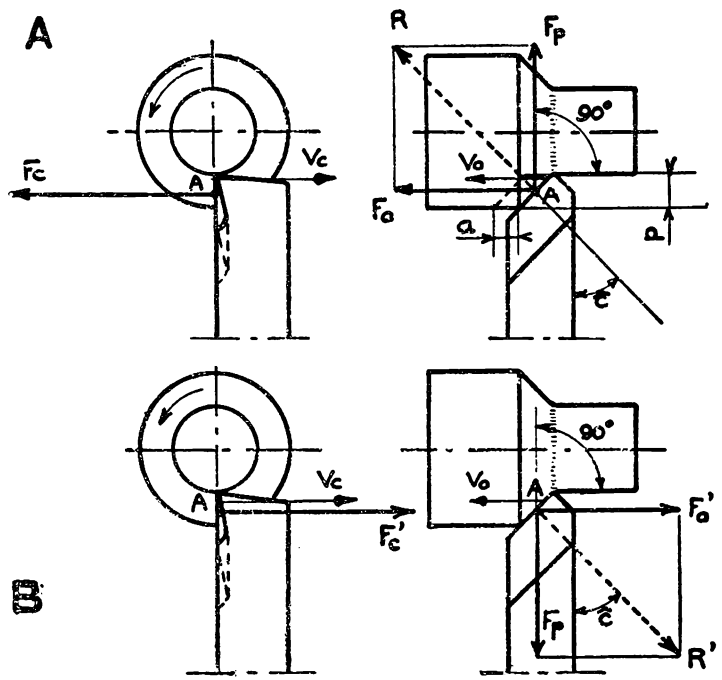


Fig. 4. — Les composantes de l'effort de coupe dans le cas d'emploi de l'outil à charioter.

2° Efforts correspondant aux principaux modes d'usinage.

a) *Rabotage.*

Les efforts se déterminent exactement comme pour le tournage (exemple qui vient d'être traité).

b) *Perçage.*

Chaque partie active du foret se comporte comme un outil de tour en rotation (*fig.* 5).

Si a représente l'avance par tour en mm, chaque arête coupante taille un copeau d'épaisseur $\frac{a}{2}$. La section du copeau étant un parallélogramme, sa surface vaut :

$$S = \frac{a}{2} \times \frac{d}{2} = (\text{base} \times \text{hauteur}).$$

La résistance spécifique à la coupe peut être prise sur le tableau ou calculée à l'aide de la formule $K = k\ (R_r)_e$.

L'effort F_c, appliqué au milieu de l'arête, a pour valeur :

$$F_c = K \frac{a \times d}{4}.$$

Les deux efforts F_c, appliqués à chaque arête, constituent le couple résistant que la machine doit vaincre. La valeur de ce couple est :

$$C = F_c \times \frac{d}{2} = K \frac{ad^2}{8}.$$

C en mm $\wedge$ N ; K en N/mm² ; a et d en mm.

L'*effort normal* R, perpendiculaire à l'arête tranchante, admet les deux composantes :

$$F_a = R \times \sin \frac{\alpha}{2} \quad \text{et} \quad F_p = R \times \cos \frac{\alpha}{2},$$

α étant l'angle de pointe du foret.

Les deux forces F_p, égales et directement opposées, s'annulent ; les deux forces F_a, parallèles et de même sens, admettent une résultante $P = 2\ F_a$, qui est l'effort de pénétration du foret. Cet effort doit être vaincu par l'ouvrier qui, dans une perceuse sensitive, appuie sur le levier commandant la descente de la broche.

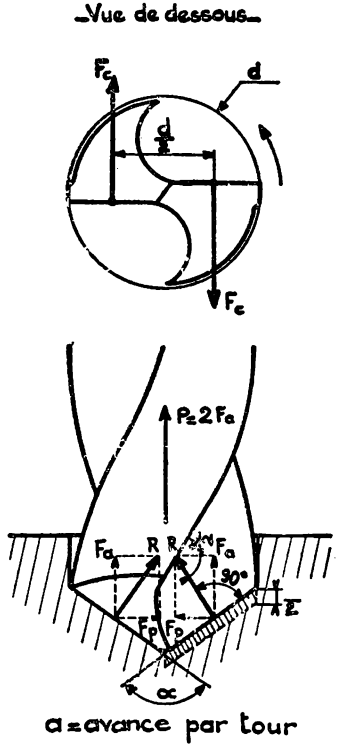


Fig. 5. — Les composantes de l'effort de coupe dans le cas d'emploi du foret.

APPLICATION.

Calculer le moment du couple nécessaire et l'effort de pénétration pour percer, avec un foret de 20 mm, *de l'acier ayant une résistance à la rupture* $(R_r)_e = 500$ N/mm². *Avance par tour* : 0,4 mm.

On prendra $K = 3 \times 500 = 1\,500$ N/mm².

$$F_c = K\frac{ad}{4} = 1\,500 \times \frac{0{,}4 \times 20}{4} = 3\,000 \text{ N.}$$

Couple nécessaire :

$$C = F_c \times \frac{d}{2} = 3\,000 \times 0{,}01 = 30 \text{ m} \wedge \text{N.}$$

Effort de pénétration. On supposera :

$$R = F_c = 3\,000 \text{ N.}$$

L'angle de pointe $\alpha = 120^o$.

$$F_a = R \times \sin\frac{\alpha}{2} = 3\,000 \times \sin 60^o = 3\,000 \times 0{,}866 = 2\,600 \text{ N.}$$

Effort de pénétration :

$$P = 2\ F_a = 2 \times 2\,600 = 5\,200 \text{ N.}$$

c) *Fraisage.*

Considérons la **fraise à denture droite** représentée *figure* 6.

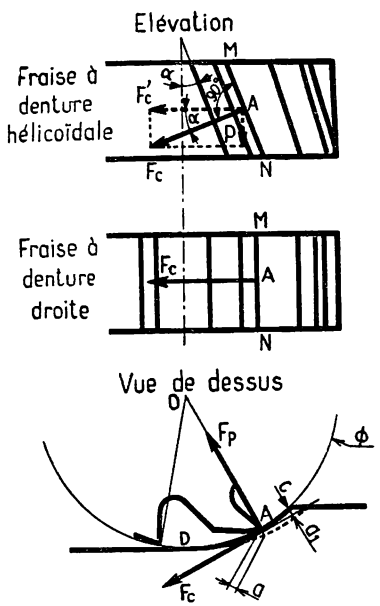


Fig. 6. — Les composantes de l'effort de coupe dans le fraisage.

L'effort de coupe F_c est tangent à la trajectoire décrite par l'arête tranchante. Sa valeur est donnée par la relation :

$$F_c = K \cdot S,$$

S représentant la section du copeau. Or, si l'on désigne par l la largeur de la pièce, on a :

$$S = l \times a'.$$

Mais a' n'est pas constant. Il passe de la valeur 0 en D à la valeur maximum a_1 en C. La section du copeau redevient nulle quand la dent quitte le métal.

L'effort F_c est donc constamment variable et il en résulte des déformations constamment variables pour l'arbre porte-fraise et souvent même pour le porte-pièce.

L'effort F_p est perpendiculaire à l'axe de la fraise et tend à faire fléchir l'arbre porte-fraise. Cet effort F_p varie en même temps que F_c.

Dans le cas d'utilisation de **fraises à denture hélicoïdale**, la force F_p garde la même direction (*fig.* 6).

L'effort de coupe F_c est à la fois tangent à la surface cylindrique décrite par les dents de la fraise et perpendiculaire à l'arête tranchante.

Il admet deux composantes :

— 1° *La force tangentielle* F'_c normale à l'axe de la fraise dont le moment $F'_c \times \frac{\Phi}{2}$ est équilibré par le couple moteur. Si α désigne l'inclinaison des dents sur l'axe, on a :

$$F'_c = F_c \times \cos \alpha.$$

— 2° *La force* P parallèle à l'axe, est un *effort de poussée* sur la fraise, transmis à la butée de la broche par l'intermédiaire de l'arbre porte-fraise.

La relation $P = F_c \times \sin \alpha$ montre que la poussée est d'autant plus importante que α est grand.

Comme l'épaisseur du copeau n'est pas la même sur toute la longueur de la dent et que, d'autre part, deux dents peuvent être en prise en même temps, les efforts qui s'exercent sur la fraise varient peu. Il y a moins de vibration, le travail est plus régulier et mieux fait.

APPLICATION.

Supposons une fraise cylindrique à denture hélicoïdale ; ***diamètre*** : 120 mm ; *inclinaison de la denture sur l'axe* : 20° ; *avance par dent* : 0,2 mm ; ***largeur de la pièce*** : 70 mm ; *métal travaillé* : *acier à* 650 N/mm².

Nous supposons une dent en prise et nous prendrons, comme section du copeau, celle qui correspond à la largeur de la pièce, avec une épaisseur égale à la moitié de l'avance par dent, soit $0{,}1 \times 70 = 7$ mm².

Effort spécifique de coupe : $K = 2\,000$ N/mm².

Effort de coupe :

$$F_c = K.S = 2\,000 \times 7 = 14\,000 \text{ N}.$$

Effort tangentiel :

$$F'_c = 14\,000 \times \cos 20° = 14\,000 \times 0{,}939 \simeq 13\,200 \text{ N}$$

Effort de poussée :

$$P = 14\,000 \times \sin 20° = 14\,000 \times 0{,}342 \simeq 4\,800 \text{ N}.$$

Couple résistant :

$$C = F'_c \times \frac{\Phi}{2} = 13\,200 \times \frac{0{,}12}{2} = 792 \text{ m} \wedge \text{N}.$$

Si la fraise fait $n = 60$ tr/mn, la puissance en kW est :

$$P = C\omega = C\frac{\pi n}{30} = \frac{792 \times \pi \times 60}{30} \simeq 5\,000 \text{ W}$$

$$P = 5 \text{ kW}.$$

Protection
des surfaces métalliques contre la corrosion

La protection des métaux contre la corrosion a, de tout temps, préoccupé utilisateurs et producteurs d'objets métalliques.

La corrosion est l'action chimique exercée sur le métal par le milieu extérieur. Les métaux usuels offrent une résistance plus ou moins grande à l'altération par l'air atmosphérique. L'or et le platine sont inaltérables.

Nous nous proposons d'étudier les moyens de protection des métaux contre la corrosion.

A. — Action de l'air sur les métaux

L'air renferme non seulement de l'oxygène et de l'azote, mais de la vapeur d'eau et des vapeurs acides : anhydride carbonique, hydrogène sulfuré, etc... Son effet sur les métaux résulte de l'action combinée de l'oxygène et de l'eau acidulée. L'existence de courants galvaniques favorise et accélère cette action. Il y a production d'oxydes, d'hydroxydes, de carbonates, de sulfures métalliques qui forment les rouilles. Leur couleur dépend de la nature du métal qui constitue l'objet altéré : verte pour le cuivre (vert-de-gris) ; blanchâtre pour l'aluminium et le magnésium ; grise pour le plomb, l'étain, le zinc ; noire pour l'argent ; brun rouge pour le fer.

Certaines rouilles sont *pulvérulentes et poreuses*, elles laissent constamment le métal en contact avec l'air qui continue ainsi son action en profondeur : c'est le cas de la rouille du fer qui ronge les pièces sans arrêt.

D'autres, au contraire, sont *compactes* et constituent, à la surface de la pièce, un « film » imperméable qui isole le métal du contact de l'air et limite l'altération : telles sont les rouilles du zinc, de l'étain, de l'aluminium, du cuivre, du chrome, du nickel, du cadmium.

Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que l'on ait songé à recouvrir les alliages ferreux avec des métaux dont les rouilles constituent l'enveloppe isolante imperméable à l'air.

B. — Causes de la corrosion

Les courants galvaniques qui favorisent la corrosion résultent de l'existence de petites piles élémentaires. Or, pour qu'il y ait pile, il faut qu'il y ait en présence deux métaux de nature différente et un électrolyte.

Nous avons vu que l'électrolyte est formé par l'humidité atmosphérique ou par les vapeurs corrosives.

Les deux métaux qui constituent les pôles des piles résultent de l'hétérogénéité du métal.

Il peut s'agir :

a) **De l'hétérogénéité de constitution.**

C'est le cas, notamment, d'un corps constitué par deux éléments distincts : perlite et cémentite, par exemple.

Il est évident qu'une solution solide ne comportant qu'un seul élément résiste beaucoup mieux à la corrosion. C'est le fait des aciers à texture austénitique : l'acier au nickel-chrome (acier à 11 % de chrome) en particulier, ou des aciers martensitiques.

Les impuretés favorisent évidemment la corrosion. Les métaux très purs (nickel, chrome, plomb, aluminium, fer Armco) résistent bien à la corrosion.

b) **De l'hétérogénéité de structure et de l'état de surface.**

Plus la structure est fine, plus l'aptitude à la corrosion est faible, car il y a, entre les cristaux, moins de place pour l'électrolyte.

L'écrouissage favorise la corrosion ainsi que les rayures d'outils.

Par contre, le polissage permet aux surfaces de résister aux effets de la corrosion.

c) **De l'hétérogénéité des contraintes mécaniques.**

Les pièces soumises à des tensions internes toujours mal réparties s'oxydent plus facilement que les pièces dont le métal est détendu par recuit : ce phénomène, confirmé par l'expérience, est encore mal expliqué.

C. — Moyens de protection

Le constructeur qui désire réaliser une pièce profondément inattaquable par le milieu ambiant a le choix entre deux solutions :

1° Utiliser un métal inaltérable ou dont l'attaque reste superficielle.

Ainsi on emploie :

a) ***Les métaux purs.***

Plomb, aluminium, fer Armco, nickel, chrome, cadmium, zinc, étain, etc.

b) ***Les alliages donnant un oxyde imperméable.***

Alliages d'aluminium, de cuivre, de zinc, d'étain.

c) ***Les alliages constitués par une solution solide.***

Aciers inoxydables.

1° **Aciers à structure martensitique** (la martensite est une solution de carbone dans le fer α) :

Aciers à moyenne teneur de chrome
Acier Z12 C13, contenant 0,12 % de C et 13 % de Cr.
Acier Z35 C13, contenant 0,35 % de C et 13 % de Cr.
Acier Z10 CN 17.03, contenant 0,1 % de C, 17 % de Cr et 3 % de Ni.
Acier Z10 CS 07.02, contenant 0,1 % de C, 7 % de Cr et 2 % de Si.

Ces aciers sont plus inoxydables s'ils sont utilisés à l'état trempé. Le dernier de ces aciers résiste à l'oxydation, même à haute température.

2° **Aciers à structure austénitique :**

Aciers au nickel-chrome Z 20 CN 18.08, contenant 18 % de Cr et 8 % de Ni, avec des additions supplémentaires de molybdène (de 1 à 4 %).

Acier réfractaire, au nickel-chrome, résistant à l'oxydation aux températures élevées : c'est l'acier Z 20 CN 25.20.

3° **Aciers à structure ferritique :**

Aciers à faible teneur en carbone et à forte teneur en chrome.

Acier Z10 C17. Il doit être utilisé recuit.

Il est bien évident que la résistance à la corrosion n'est pas la même pour tous ces corps, lorsqu'ils sont mis en présence de vapeurs ou de liquides acides ou basiques différents.

Les corps qui viennent d'être cités résistent à la corrosion par l'air atmosphérique. Il y a lieu de faire des essais ou de poser la question aux fournisseurs si les dangers de corrosion proviennent de vapeurs ou du contact avec des liquides d'origine chimique.

2° Exécuter la pièce en acier ou en fonte et la recouvrir d'une gaine isolant le métal du milieu ambiant.

Cette gaine isolante peut être obtenue :

1° **Par recouvrement de la pièce au moyen d'enduits** : peintures, vernis, laques, émaux (cuits à haute ou à basse température), goudrons, corps gras (graisses et huiles).

2° **Par recouvrement de la pièce au moyen d'un métal dont la rouille compacte constitue la couche imperméable protectrice :**

Ce métal peut être déposé :

a) par *trempage* dans un métal en fusion : galvanisation, étamage, plombage ;

b) par *projection* d'un métal fondu : métallisation au pistolet ;

c) par *substitution* et déplacement : étamage au bain ;

d) par *électrolyse* : cuivrage, nickelage, chromage, cadmiage.

3° **Par modification superficielle de la composition du métal :**

a) création d'un alliage : cémentation au zinc, à l'aluminium ;

b) altération chimique de la surface :

oxydation : bronzage, brunissage, oxydation anodique ;
phosphatation ;
mordançage.

D. — Buts accessoires du recouvrement des pièces métalliques

Le recouvrement des pièces métalliques n'a pas seulement pour objet d'assurer une protection efficace contre les agents atmosphériques et chimiques. Il peut également augmenter la résistance à l'usure (chromage épais) et rendre possible la réparation des pièces usées ou présentant un défaut d'usinage (chromage, nickelage, cuivrage épais). Enfin, les dépôts métalliques ou couches d'enduits peuvent présenter un intérêt pour la décoration des pièces (chromage, nickelage, argenture, dorure, peinture, vernissage, émaillage).

PRÉPARATION DES PIÈCES A PROTÉGER CONTRE LA CORROSION

L'application des enduits ou dépôts métalliques suppose une surface de pièce lisse et le métal mis à nu.

Deux traitements distincts sont prévus dans la majorité des cas :

— un *polissage* destiné à faire disparaître les sillons laissés par les outils ;

— un *nettoyage* parfait pour éliminer les corps gras et la pellicule d'oxyde qui recouvrent le métal. Ce nettoyage comprend un *dégraissage* et un *décapage.*

A. — Polissage

1° Polissage mécanique.

Le polissage est un usinage de surface, au moyen d'abrasifs de plus en plus fins.

Les abrasifs sont collés sur des disques de bois ou de feutre animés d'un mouvement de rotation rapide, comme les meules. La vitesse circonférentielle peut atteindre 50 m/s.

Les dernières passes sont exécutées en utilisant un paquet de disques de toile, tournant à grande vitesse et enduits d'un mélange de poudres abrasives très fines, avec de la stéarine ou de la paraffine.

Le polissage des grandes surfaces peut être obtenu en utilisant des machines rotatives à flexible ou des machines à bandes abrasives. Pour polir les petites pièces, on les met en vrac, avec des billes en acier et de la poudre abrasive, dans un tonneau métallique tournant lentement.

Le polissage des pièces est indispensable si l'on veut avoir un revêtement protecteur durable.

2° Brillantage et polissage chimiques ou électrolytiques des alliages métalliques.

La plupart des métaux ou alliages (laitons, cuivre, aciers inoxydables, aluminium à moins de 1 % de silicium, cadmium, zinc...) peuvent être polis ou brillantés chimiquement ou électrolytiquement.

Le polissage chimique ou électrolytique consiste dans la dissolution sélective des aspérités du métal. Il confère à la surface un pouvoir réflecteur élevé. Le brillantage réalise à un moindre degré un aplanissement de la surface. Brillantage et polissage chimiques sont obtenus sans avoir recours au passage d'un courant électrique. Dans le polissage électrolytique, une source de courant (génératrice, redresseur) est indispensable. Les pièces à traiter servent d'anode.

Cependant, le polissage chimique ne diffère pas essentiellement du polissage anodique, la source de courant étant constituée par la multitude de couples locaux (piles) qui se manifestent à la surface du métal pendant l'opération. Pour augmenter la tension de ces couples, on opère à haute température, en présence d'oxydants et d'un sel d'un métal lourd.

Les formules de polissage et brillantage chimiques ou électrolytiques sont très nombreuses, généralement brevetées.

Procédé électrolytique pour tous métaux : mélange d'acide perchlorique et d'anhydride acétique (brevet français JACQUET). En raison de l'instabilité de l'acide perchlorique et afin d'éviter tout danger d'explosion, il faut opérer à froid et en l'absence d'impuretés réductrices.

Pour les alliages d'aluminium, on utilise des bains alcalins (soude + phosphate trisodique + fluorure de sodium) ou des bains acides (mélange phosphorique, sulfurique, chromique,...) ; température : 90°C.

Pour les laitons et cuivre : mélange phosphorique, nitrique, acétique.

Pour l'acier inoxydable Z 20 CN 18.08 : mélange phosphorique, sulfurique ; à 80°C, densité de courant : 10 à 15 A/dm².

Pour le cadmium : acide chromique 150 g/l, acide sulfurique 3,75 g/l ; à froid, sans courant.

B. — Nettoyage des surfaces

Le nettoyage, qui a pour objet d'enlever les souillures existant à la surface des pièces, comprend deux opérations distinctes :

— le **dégraissage** qui élimine les corps gras ;

— le **décapage** qui élimine les oxydes.

1° Dégraissage

a) Son mécanisme est complexe :

1° La **saponification consiste** dans la décomposition du corps gras, sous l'action d'une base alcaline (soude). On obtient un savon (sel sodé d'un acide gras) et de la glycérine, qui, étant solubles, s'éliminent facilement par lavage. La saponification conduit à l'emploi de solutions alcalines concentrées et chaudes.

2° **Emploi de dissolvants** : les graisses minérales ne sont pas saponifiables ; on les élimine en traitant les pièces par des dissolvants : essence et, plus particulièrement, trichloréthylène et perchloréthylène. On plonge la pièce dans le solvant ; au besoin, on frotte sa surface au moyen d'une brosse.

3° La présence d'un produit tensio-actif dans un bain de dégraissage a pour effet de produire un mouillage de la surface à nettoyer, ce qui diminue l'aire de contact de la goutte graisseuse avec la pièce et en facilite l'élimination. Au surplus, le produit tensio-actif produit l'émulsion de la graisse, c'est-à-dire sa division en une multitude de particules sphériques qui sont décollées de la surface souillée et mises en suspension dans le bain.

b) Une solution de dégraissage comprendra de la soude, des sels alcalins d'acides faibles et un produit tensio-actif (ou mouillant).

On prendra :

Phosphate trisodique : 25 g/l.
Métasilicate de soude : 30 g/l.
Carbonate de soude : 25 g/l.
Agent mouillant (un alkylarylsulfonate de soude) : 3 g/l.

Température : 80°C.

c) *Dégraissage électrolytique.*

Le passage du courant dans un électrolyte alcalin donne lieu à un violent dégagement gazeux sur la surface des pièces, ce qui facilite l'élimination des souillures solides. On peut utiliser la solution ci-dessus (à chaud) ou encore la suivante (à froid) :

Soude : 70 g/l.
Cyanure de soude : 25 g/l.
Carbonate de soude : 30 g/l.
Phosphate trisodique : 30 g/l.
Agent mouillant (alkylarylsulfonate de soude) : 3 g/l.

Densité de courant : 10 à 15 A/dm² ; pièces en cathode ou en anode.

La durée de l'opération ne doit pas excéder 1 minute, afin d'éviter le dépôt, sous forme peu adhérente, de métaux parasites.

Dans le *dégraissage-cuivrage*, on réalise, dans le même bain, un dégraissage électrolytique (30 secondes), suivi du dépôt d'un léger film de cuivre.

On utilise l'électrolyte :

Soude : 70 g/l.
Cyanure de soude : 15 g/l.
Cyanure cuivreux : 8 g/l.
Carbonate de soude : 30 g/l.
Un mouillant : 3 g/l.

Anodes de cuivre, pièces en cathode ; 8 à 10 A/dm² (voir *fig.* 1).

Un rinçage à l'eau froide, ou deux rinçages, l'un à l'eau chaude, l'autre à l'eau froide, complètent le traitement de dégraissage.

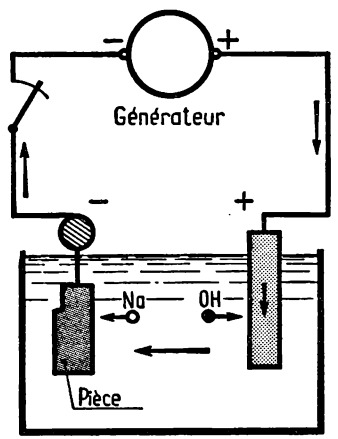


Fig. 1. — Dégraissage électrolytique.

d) *Dissolution des corps gras.*

L'élimination des corps gras est obtenue en utilisant des solvants : essence, benzine, trichloréthylène.

L'essence et la benzine ont disparu de tous les ateliers où l'on a le souci de la sécurité du personnel.

Le trichloréthylène liquide, de densité 1,47, ininflammable, qui bout à 88°, est le solvant universellement utilisé. Les pièces à dégraisser sont immergées dans le liquide chauffé à 60°, ou disposées dans le trajet des vapeurs de trichloréthylène.

Par distillation, on peut récupérer le solvant et le séparer des huiles dissoutes. Les installations de dégraissage au trichloréthylène sont exécutées en tôle d'acier galvanisé ou étamé.

2° Décapage.

Les oxydes, qui adhèrent à la surface des pièces, peuvent être éliminés par une action mécanique (*sablage*) ou chimique (*action d'un acide*).

a) *Décapage mécanique : sablage.*

On envoie sur les pièces un jet d'air comprimé (de 1 à 4 kgf/cm², soit 0,1 à 0,4 mégapascal) qui entraîne des grains de silice, de granit broyé ou de grenaille d'acier trempé. Cette opération, qui dégage des poussières nocives, se fait à l'intérieur d'un coffre étanche. L'ouvrier porte un masque et des gants de cuir ou de caoutchouc. Le sablage peut être complété par un décapage à l'acide fluorhydrique qui permet d'éliminer le sable adhérant aux pièces de fonte.

b) *Décapage chimique.*

Il résulte de l'action d'un acide étendu sur l'oxyde du métal. Pour décaper les aciers au carbone, l'aluminium et ses alliages, on utilise des bains contenant de l'eau additionnée de :

5 à 15 % d'acide sulfurique,
10 % d'acide chlorhydrique,
2 à 15 % d'acide fluorhydrique.

Les aciers inoxydables se décapent avec un bain contenant :

15 % d'acide chlorhydrique,
15 % d'acide azotique,
5 % d'acide sulfurique
et de l'eau.

Pour le cuivre et ses alliages, on emploie un bain contenant un mélange d'acide azotique (5 %), d'acide sulfurique (5 %) et d'eau.

Le décapage peut se faire à froid, mais l'opération est notablement accélérée lorsque la température du bain augmente ; 70° semble être la température couramment adoptée.

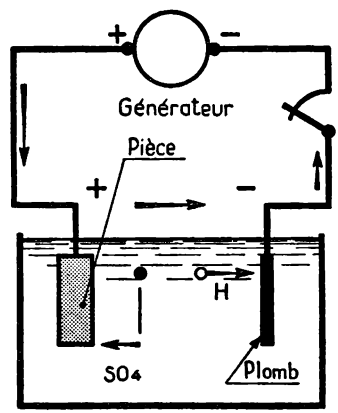


Fig. 2. — Décapage électrolytique.

L'acide attaque non seulement l'oxyde adhérent, mais aussi le métal. La réaction s'accompagne d'un violent dégagement d'hydrogène. Une partie de cet hydrogène est absorbée par le métal qui devient fragile.

Il a donc été utile d'introduire dans le bain un limiteur de décapage qui a pour effet de retarder l'action de l'acide sur le métal sans gêner la dissolution de l'oxyde. Les limiteurs de décapage sont à base de colle, fécule, amidon, goudrons, dérivés de l'arsenic ou composés organiques sulfurés. Des suspensions colloïdales se produisent et se déposent sur le métal mis à nu, ralentissant ainsi l'action de l'acide.

c) *Décapage électrolytique.*

Pour accélérer l'opération de décapage, on peut provoquer l'attaque de l'oxyde superficiel par de l'acide naissant, plus actif que l'acide de la solution.

Dans un bain d'eau et d'acide sulfurique, plongent les pièces à décaper formant anode (+) et une plaque de plomb servant de cathode (—) (*fig.* 2).

Il se produit, à l'anode, des réactions chimiques dont l'effet principal est le décollement de la pellicule d'oxyde qui tombe au fond du bac. Le métal est ainsi rapidement mis à nu.

d) *Rinçage.*

Les opérations de décapage doivent être suivies d'un ou plusieurs rinçages à l'eau froide. L'immersion des pièces dans un bain basique, destiné à neutraliser toute trace d'acide, peut utilement suivre les rinçages à l'eau pure.

PROTECTION DES PIÈCES

A. — Protection au moyen d'enduits

Les enduits protecteurs comprennent les peintures, les vernis, les laques et les matières plastiques.

L'application de ces enduits suppose une préparation préalable des surfaces, comportant : un dégraissage, un décapage et quelquefois même un polissage.

1° Les peintures.

Les peintures sont constituées par :

- **une huile siccative** (huile de lin, d'œillette, de soja) qui se résinifie à l'air et donne une pellicule solide qui protège et embellit l'objet peint ;
- **un pigment coloré**, composé d'oxydes ou de sels métalliques : oxyde de zinc (blanc), oxyde de fer hydraté (ocre jaune), oxyde de chrome (vert), sulfure de mercure (vermillon), etc. ;
- **un fluidifiant**, destiné à rendre plus fluide la peinture et à permettre son application au pinceau ou au pistolet : l'essence de térébenthine ;
- **un siccatif** (mélange d'huile de lin cuite avec des sels de manganèse ou de plomb), destiné à accélérer la résinification de l'huile siccative et le séchage de la peinture.

Contrairement à ce qu'on pourrait supposer, les peintures sont *poreuses* et *perméables* à l'air et à l'humidité.

Pour obtenir une protection efficace, il est indispensable de recouvrir le métal d'une couche d'apprêt compact ou de minium (huile de lin et oxyde de plomb) avant d'étendre la peinture.

Lorsque le pigment coloré est remplacé par de la poudre d'aluminium très fine, on obtient une peinture qui constitue un revêtement protecteur de qualité.

2° Les vernis.

Les vernis, utilisés pour la protection et la décoration des surfaces métalliques, sont cellulosiques. Ils sont constitués par :

— **une solution** de nitrocellulose ou d'acétocellulose dans l'acétone ou l'alcool ;

— **un pigment coloré** : sel ou oxyde métallique finement broyé ;

— **des gommes ou résines,** pour donner de l'adhérence ;

— **un plastifiant,** destiné à faciliter la production d'une pellicule résistante et élastique ;

— **un diluant** permettant d'obtenir une grande fluidité : l'alcool butylique.

Les vernis sont généralement appliqués au pistolet sur une couche d'apprêt. Ils sèchent rapidement et peuvent être polis. Ils sont utilisés notamment pour protéger les carrosseries d'automobiles.

3° Les émaux.

Les émaux sont des produits vitrifiés cuits.

L'application comprend :

— **une couche de produits peu fusibles** : feldspath, quartz et borax ;

— **la couche d'émail,** constituée par du kaolin et de l'oxyde d'étain, de plomb, de titane.

La pièce ainsi préparée est portée, dans un four, à une température de cuisson comprise entre 500 et 1 000°. La vitrification se produit ; l'émail se solidifie et constitue une couche imperméable qui assure une protection très efficace contre l'oxydation et l'attaque par la plupart des acides organiques et minéraux.

4° Les matières plastiques.

Les pièces sont recouvertes d'une couche de chlorure de polyvinyle, au pinceau ou au trempé, puis portées à l'étuve, à 150°C.

B. — Protection par recouvrement métallique

1° Trempage des pièces dans un métal en fusion.

Le procédé porte alors les noms de : galvanisation (zinc), étamage (étain), plombage (plomb).

Les pièces à traiter doivent être préalablement dégraissées et décapées.

L'opération comporte deux immersions successives dans le bain du métal en fusion, si l'on veut obtenir un dépôt exempt de défauts.

L'étamage est surtout réservé à la protection des objets devant recevoir des aliments : ustensiles de ménage, boîtes de conserves.

2° Projection, au pistolet, d'un métal fondu.

L'expérience suivante met en évidence le principe du procédé:

Une bille de plomb, lancée avec force contre une plaque, laisse sur celle-ci une trace métallique. L'énergie cinétique $\frac{mv^2}{2}$, disponible lorsque la bille est entrée en contact avec la plaque, s'est en partie transformée en chaleur. Cette chaleur a été suffisante pour fondre du plomb et le faire adhérer à la plaque. On vient ainsi de réaliser la métallisation de la plaque au plomb.

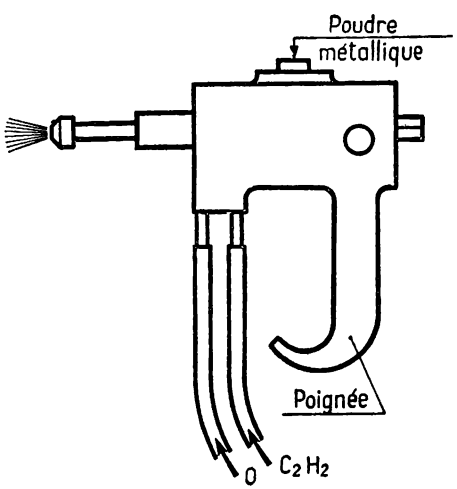


Fig. 3. — Pistolet pour recouvrement métallique par projection d'un métal fondu.

Il est possible de métalliser un corps en utilisant un métal dont le point de fusion est supérieur à celui du plomb. Il suffit de projeter ce métal en fusion sur la pièce à recouvrir. La volatilisation et la projection du métal sont obtenues en utilisant un pistolet à chalumeau oxyacétylénique et à air comprimé. Le métal est introduit dans le pistolet sous forme de fil entraîné automatiquement par des molettes, ou de poudre aspirée par un injecteur tronconique, genre Giffard (*fig.* 3).

Les principaux métaux ou alliages que l'on peut projeter sont : l'étain, le zinc, le plomb, le cuivre, le bronze, les laitons, l'aluminium, le cadmium, les ferro-nickels, les aciers inoxydables, etc.

On peut métalliser n'importe quel corps solide : les métaux, le plâtre, le staff, les matières plastiques, le bois, le carton, le verre, les tissus...

La métallisation, qui porte les noms de *shoopage*, procédé SCHORI, procédé CHAMPION, est utilisée :

— pour *assurer la protection contre l'oxydation* (zingage, aluminage, cuivrage, recouvrement par acier inoxydable) ;

— pour *recharger une pièce métallique usée* (rechargement d'arbres, de pignons) ;

— pour *réaliser une décoration* (aluminage, cuivrage, cadminage de tissus, papiers, plâtre, staff).

3° Recouvrement par substitution et déplacement.

Principe.

Si l'on plonge, dans un bain de sulfate de cuivre, une pièce en acier convenablement dégraissée et décapée, elle se recouvre, au bout de quelques secondes, d'un dépôt de cuivre : du sulfate de cuivre s'est transformé en sulfate de fer et le cuivre libéré s'est déposé sur la pièce.

L'étamage à chaud d'objets en alliages ferreux (visserie, pièces pour horlogerie et appareils électriques) est une application de ce principe.

Les pièces, dégraissées au trichloréthylène et décapées, sont immergées dans un bain de sels complexes d'étain, porté à 100° environ. Au bout de deux heures, l'épaisseur du dépôt d'étain peut atteindre 1/10 de mm (*fig.* 4).

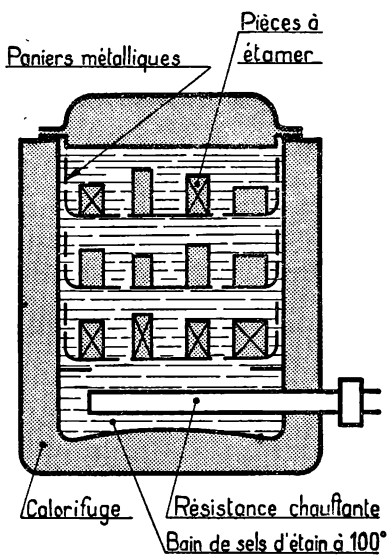


Fig. 4. — Bain pour métallisation par substitution et déplacement.

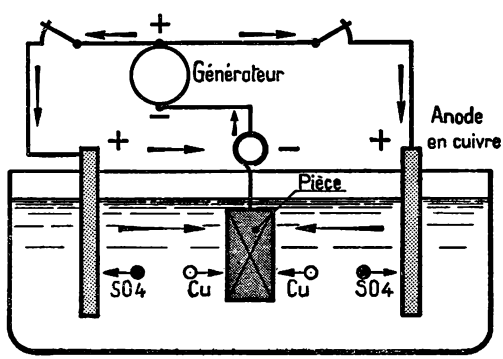


Fig. 5. — Schéma de principe du cuivrage par électrolyse.

4° Recouvrement métallique obtenu par électrolyse.

Principe.

Dans un électrolyte, constitué par un sel du métal à déposer en solution dans l'eau, plongent : une anode, constituée par ce métal à l'état massif, et les pièces à recouvrir qui servent de cathode.

Supposons qu'on ait à réaliser un dépôt de cuivre : le sel en solution sera le sulfate de cuivre (*fig.* 5). Les ions Cu se dirigent vers la cathode et se déposent sur la pièce. Les anodes sont attaquées par les ions SO_4 et le sulfate de cuivre dissocié est reconstitué. Le phénomène se ramène donc à un transport de cuivre des anodes sur les pièces.

Pour obtenir un dépôt régulier sur les différentes faces des pièces, on place toujours une cathode entre deux anodes et, au cours de l'opération, on modifie l'orientation des pièces. Lorsqu'on désire un dépôt intérieur, il est indispensable de prévoir une anode pénétrant dans les pièces (anode auxiliaire).

Dépôts électrolytiques possibles.

On peut, par électrolyse, déposer sur des pièces métalliques les corps suivants :

— cuivre, laiton, étain, plomb, nickel, chrome, cadmium, argent et or.

Très souvent, le métal protecteur n'est pas déposé directement sur la pièce, mais sur une ou plusieurs sous-couches intermédiaires qui favorisent une meilleure adhérence.

Un dépôt de nickel se fait toujours sur une sous-couche de cuivre ; il faut cuivrer, puis nickeler une pièce en acier avant de procéder à un dépôt de chrome.

Bains d'électrolyse.

Les électrolytes industriels contiennent évidemment des sels du métal à déposer. Ils contiennent aussi d'autres corps dont les rôles sont divers : certains d'entre eux (sels, bases, acides...) facilitent le phénomène électrolytique ; en particulier, ils augmentent la conductivité du bain et autorisent des densités de courant plus élevées. D'autres produits, désignés sous le nom d'*agents d'addition*, à l'action chimique parfois mal définie, ont pour résultat d'améliorer les qualités physiques du dépôt : finesse de cristallisation, ductilité, dureté, absence de porosité, et surtout brillance.

On admet qu'un dépôt brillant est caractérisé par une très grande finesse de cristallisation. Certains agents d'addition, produits organiques à poids moléculaire élevé, entravent le développement des cristaux. Ils constituent des *brillanteurs* pour le bain. On trouve, au surplus, dans la plupart des électrolytes, un produit mouillant, encore appelé *agent antipiqûres* ou *abaisseur de tension super-*

ficielle. Il facilite l'évacuation de l'hydrogène au niveau de la cathode et évite ainsi la formation de piqûres dans le dépôt.

1° **Bains de cuivrage.**

a) *Bain alcalin au sel de Rochelle.*

Le sel de Rochelle (ou sel de Seignette) est un tartrate double de sodium et de potassium, dont le principal intérêt est de favoriser la dissolution de l'anode.

Le bain classique ROCHELLE a la composition suivante :

Cyanure de cuivre : 26 g/l.
Cyanure de sodium : 35 g/l.
Carbonate de soude : 30 g/l.
Sel de Rochelle : 45 g/l.
Soude : 10 g/l.

Température : 60°C ; densité de courant : jusqu'à 5 A/dm².

Le dépôt est semi-brillant, de cristallisation fine. La soude, en imposant une certaine alcalinité au bain, évite l'attaque de la cuve en fer.

b) *Bain acide au sulfate.*

Sulfate de cuivre : 250 g/l.
Acide sulfurique : 60 g/l.

Densité de courant : 5 A/dm² ; anode de cuivre pur.
Température : jusqu'à 50°C.

Le bain acide ne peut être utilisé directement sur les métaux ferreux, en raison du phénomène de déplacement chimique qui se produit lorsqu'on plonge une pièce en fer dans une solution de sulfate de cuivre. Du cuivre pulvérulent se dépose sur le fer et provoque une mauvaise adhérence du dépôt électrolytique. Les bains alcalins de cuivrage ne donnent pas lieu au phénomène de déplacement chimique, le cuivre s'y trouvant sous forme de sel complexe (cyanure double de cuivre et de sodium).

Le cuivrage acide sur métaux ferreux exige donc une sous-couche de cuivre alcalin, ou de nickel. Il s'impose cependant lorsqu'on veut un cuivrage épais, de plus de 30 microns (cylindres d'imprimerie).

Plusieurs avantages sérieux sont donc à l'actif du bain de cuivrage alcalin :

— Il remplace les deux opérations de précuivrage et cuivrage acide par un seul cuivrage alcalin, d'où économie de main-d'œuvre.

— Il n'attaque pas les parties internes, donc ne se détériore pas comme le bain de cuivrage acide.

— Il s'applique au fer, à la fonte, au zinc, etc.

— Il a un meilleur pouvoir de pénétration que le cuivre acide.

A égalité de rendement et d'intensité, le dépôt est plus rapide, le cuivre étant déposé à la valence 1.

c) *Bain alcalin concentré de la* Dupont de Nemours.

Plus ou moins contrefait dans de nombreux pays, il est le seul à donner, au stade industriel, des dépôts parfaitement brillants, dispensant de tout avivage.

Cyanure de cuivre : 120 g/l.
Cyanure de sodium : 130 g/l.
Soude caustique : 25 g/l.
Sulfocyanure de sodium : 15 g/l.
Agent anti-piqûres (bétaïne) : 1,5 g/l. } Agents de brillance

Température : 80°C ; densité de courant : de 1 à 11 A/dm².

2° **Bains de nickel.**

a) *Bains de nickel donnant des dépôts brillants.*

La solution de base, dite *bain de Watt*, contient :

Sulfate de nickel : 300 g/l.
Chlorure de nickel : 75 g/l.
Acide borique : 40 g/l.

La solution de Watt donne des revêtements de nickel mat. La brillance est obtenue par addition de trois produits différents :

— *Un agent de brillance* qui contribue à accuser la brillance des dépôts au fur et à mesure de leur épaississement. Il permet d'atténuer les fines rainures de polissage.

— *Un agent stabilisant* (produits aromatiques mono ou polysulfonés) qui permet l'utilisation de l'agent de brillance sous une concentration plus élevée ; il contribue aussi à la brillance du dépôt. Il autorise, en outre, une marge plus grande de densité de courant et atténue généralement la sensibilité du bain aux impuretés.

— Le troisième produit (*anti-piqûres*) favorise le dégagement des bulles d'hydrogène à la cathode et empêche ainsi les piqûres.

La liste des agents de brillance, minéraux ou organiques, est très longue. Des familles entières de produits ont été brevetées.

Parmi les plus utilisés actuellement, citons le paratoluène sulfonamide, la saccharine et, comme antipiqûres, les alkylarylsulfonates de soude. Ces bains autorisent, à une température de 60°C, une densité de courant de 4 à 8 A/dm².

b) *Bains de nickel à dépôt mat.*

Ce sont des bains anciens, de moins en moins utilisés.

A la température ambiante, la solution contenant 180 g/l de sulfate de nickel, 15 g/l de chlorure d'ammonium, 20 g/l d'acide borique, est d'une stabilité remarquable. A chaud (40°C à 50°C), on peut doubler les concentrations.

3° **Bains de chromage.**

a) *Bain classique.*

Acide chromique : 300 g/l | rapport : $\frac{\text{acide sulfurique}}{\text{acide chromique}} = \frac{1}{100}$ indispensable.

Acide sulfurique : 3 g/l.

Température : 40°C ; densité de courant : 8 à 15 A/dm².
Anodes en plomb à 6 % d'antimoine ou d'étain.

Ce bain est répandu dans le monde entier.

b) *Bains récents.*

Ils utilisent l'acide chromique (300 g/l) mais remplacent partiellement l'acide sulfurique par l'acide fluosilicique. Leur intérêt est une plus grande vitesse de dépôt et une régulation automatique de la teneur en acide sulfurique et en acide fluosilicique accompagnant l'acide chromique dans l'électrolyte.

4° **Bains de cadmiage.**

On réalise le bain par action du cyanure de sodium sur l'oxyde de cadmium. Il se forme du cyanure double de sodium et de cadmium, et de la soude. On prend :

30 g/l d'oxyde de cadmium pour 135 g/l de cyanure de sodium.

Température d'utilisation : 18 à 20°C ; densité de courant : 1,5 à 2,5 A/dm².

Le rapport du cyanure total, évalué en cyanure de soude, au métal, doit être voisin de 4 pour un bain en bon fonctionnement.

Les brillanteurs couramment utilisés sont l'huile sulfiricinée (2 g/l) et le sulfate de nickel (1,5 g/l). Une épaisseur de 10 microns est obtenue en 12 minutes.

Pour éviter le ternissement de la surface cadmiée, augmenter la brillance du dépôt et supprimer les taches dues à des traces de doigts, par exemple, on plonge les pièces cadmiées pendant quelques secondes dans une solution acide, à pouvoir oxydant élevé, dans laquelle se produit une très légère dissolution du cadmium, sans dégagement d'hydrogène. On utilise un mélange d'acide sulfurique (1,5 g/l) et d'acide chromique (120 g/l). La surface cadmiée se trouve *passivée* par l'acide chromique.

La résistance à la corrosion est bien plus considérablement augmentée par la *passivation irisée* : on plonge la pièce pendant quelques secondes, au sortir du bain de cadmium, après rinçage, dans une solution contenant 200 g/l de bichromate de soude et 10 g/l d'acide sulfurique.

5° **Bains de zingage.**

L'électrolyte est industriellement obtenu par action du cyanure de sodium sur

l'oxyde de zinc. On obtient un cyanure double de sodium et de zinc, et de la soude.

On prend :

32 g/l d'oxyde de zinc (correspondant à 25 g/l de zinc)
50 g/l de cyanure de sodium
25 g/l de soude.
Température : 18 à 30°C ; densité de courant : 1,5 à 5 A/dm².

Pour un bon fonctionnement du bain, il faut :

$$\text{rapport : } \frac{\text{cyanure total évalué en cyanure de soude}}{\text{zinc}} = 2 \pm 0{,}2$$

$$\text{rapport : } \frac{\text{soude}}{\text{zinc}} = 2{,}2 \pm 0{,}2.$$

Les brillanteurs les plus couramment utilisés sont : l'héliotropine bisulfitée (8 g/l), associée au molybdate de soude (4 g/l).

Dans de nombreux bains de zinc brillant, le dépôt sort de l'électrolyte recouvert d'un voile brun qu'il convient de dissoudre par immersion, pendant quelques secondes, dans une solution de décapage oxydant (acide nitrique à 1 % ou acide sulfurique + acide chromique ; ou acide sulfurique + eau oxygénée).

La passivation irisée est obtenue comme pour le cadmium par immersion dans une solution contenant 200 g/l de bichromate de soude et 10 g/l d'acide sulfurique.

6° **Bain d'argenture.**

Cyanure d'argent : 25 g/l.
Cyanure de soude : 50 g/l.
Brillanteurs : oxyde de sélénium, sulfure de carbone, thiosulfate d'ammonium.
Température : 20°C ; densité de courant : 0,8 A/dm².
Anodes en argent pur.

7° **Bain de dorure.**

Cyanure double d'or et de potassium : 4 g/l.
Cyanure de potassium : 6 g/l.
Phosphate de sodium : 10 g/l.
Brillanteur : hyposulfite de soude (1 g/l.)
Température : jusqu'à 60°C ; densité de courant : 0,1 à 0,5 A/dm².
Anodes en acier inoxydable.

Conduite d'une opération d'électrolyse.

Un dépôt électrolytique n'adhère à un métal que si celui-ci est chimiquement mis à nu.

Les opérations préalables de dégraissage et de décapage sont fondamentales.

L'exécution d'un dépôt électrolytique comporte les opérations suivantes (*fig.* 6) :

1° **Dégraissage** : en solution alcaline, à l'ébullition, à la machine à laver ou au trichloréthylène ;

2° **Dégraissage** : électrolytique, avec léger cuivrage ;

3° **Rinçage** : à l'eau chaude ou à l'eau froide ;

4° **Décapage** : en solution sulfurique et chlorhydrique à chaud ou à froid ;

5° **Rinçage** : à l'eau froide si le bain d'électrolyse est acide, ou neutralisation dans une solution à 20 % de cyanure de sodium si le bain est alcalin ;

6° **Dépôt électrolytique ;**

7° **Rinçage à chaud.**

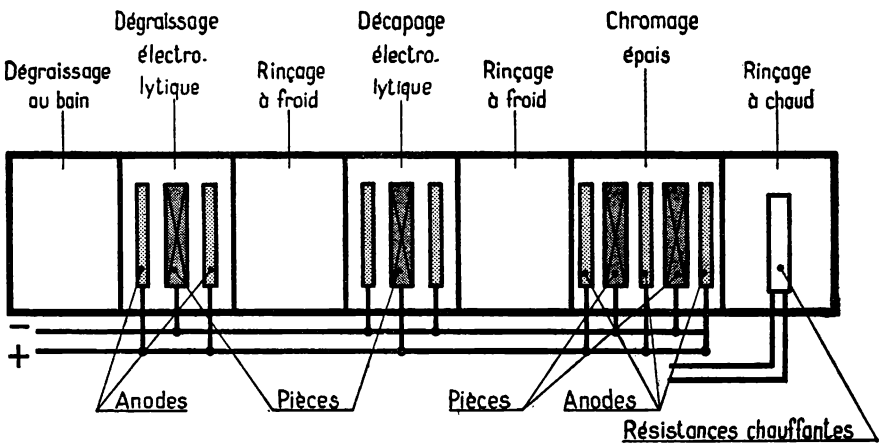


Fig. 6. — Vue de dessus d'une installation de chromage épais.

Les dépôts électrolytiques : le chromage dur.

Les dépôts électrolytiques, destinés à protéger le métal de base contre la corrosion, sont peu épais : de 0,005 à 0,02 mm.

Le chrome étant un métal extrêmement dur et résistant bien à la corrosion, il est utilisé sous forme de dépôt épais (jusqu'à 1 ou 2/10 de mm) pour rendre les pièces mécaniques inoxydables et résistantes à l'usure.

On est arrivé à réaliser, directement sur l'acier, un dépôt épais de chrome très adhérent. L'opération se faisant à froid, aucune déformation des pièces n'est à craindre.

Les applications du chromage dur sont nombreuses : traitement des outillages, des pièces mécaniques, des calibres de contrôle, réparation des pièces usées, ou exécutées à une cote trop faible.

a) **Traitement des outillages.**

Les pièces sont d'abord usinées à l'outil, à quelques centièmes de mm des cotes, puis elles sont chromées. La mise aux cotes est ensuite obtenue par rectification. L'épaisseur du chrome qui doit subsister sur les pièces est de 3 ou 5/100 de mm. Elle ne doit jamais être inférieure à 2/100 de mm. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de poinçons, filières et même de matrices pour le travail des métaux à chaud et par choc.

Certains outils (forets, alésoirs, tarauds) ont pu recevoir également un dépôt épais de chrome. Ils sont exécutés en acier trempé, le chrome n'ayant ici pour but que d'en augmenter la durée, en diminuant le nombre des affûtages. L'application du chrome, dans ce cas, n'est vraiment intéressante que pour le travail des métaux tendres, très malléables (cuivre, bronze et aluminium) et dont le copeau crée, sur la face d'attaque de l'outil, un frottement important. Pour le travail des fontes et des aciers, l'application du chromage dur n'a pas donné de résultats intéressants.

b) **Traitement des pièces mécaniques.**

Pour réduire l'utilisation des aciers spéciaux et pour augmenter la qualité du matériel, on a songé à utiliser le chromage dur dans la fabrication des organes de machines soumis à des frottements importants. La trempe ou la cémentation ont pu être évitées et, de ce fait, toute déformation par tensions internes n'est plus à craindre. Les principales pièces traitées sont : les vilebrequins, les arbres à cames, le dessus des pistons, l'intérieur des cylindres de moteurs à explosion et des moteurs Diesel, les portées des roulements, certaines glissières et parfois les bancs des machines-outils.

c) **Traitement des calibres de contrôle.**

Le chromage dur trouve ici des applications très nombreuses. Il a permis d'augmenter considérablement la durée des calibres, non seulement en raison de la dureté du chrome, mais aussi à cause de son inoxydabilité.

Il est possible, lorsque l'usure des calibres est trop importante, de déchromer, rechromer et rectifier à nouveau ; on réalise ainsi d'importantes économies, car les appareils de contrôle coûtent en général très cher.

d) **Réparation des pièces usées ou exécutées à une cote trop faible.**

Il est à peine utile d'insister sur les avantages pécuniaires que peut présenter ce mode de réparation. Lorsque l'épaisseur du dépôt est supérieure à 5/10 de mm, on a intérêt à recharger la pièce avec du cuivre ou du nickel avant de procéder à un chromage, car le cuivrage ou le nickelage sont des opérations moins onéreuses et plus rapides.

C. — Protection par modification superficielle de la composition du métal

1° Création d'un alliage superficiel.

a) *Cémentation au zinc.*

Ce procédé, appelé **shérardisation** ou **thermonisation**, est réservé aux alliages ferreux : fontes et aciers.

Les pièces, placées dans des caisses métalliques avec un mélange de sable très fin, de corps réducteurs et de poudre de zinc, sont chauffées à 420° pendant une à deux heures. La cémentation des petites pièces se fait dans des caisses cylindriques animées, dans le four, d'un mouvement de rotation très lent : 10 à 20 tr/mn. Ainsi, le renouvellement du zinc est assuré et la durée de la cémentation se trouve réduite de moitié.

Les pièces à traiter doivent subir, avant la cémentation, une série d'opérations qui ont pour but de les rendre propres à subir une absorption superficielle de zinc : sablage, dégraissage, décapage dans une solution acide, rinçage à l'eau chaude et froide, puis séchage.

La cémentation au zinc, qui donne une couleur grise, constitue une excellente protection contre la corrosion. Elle s'applique à la boulonnerie, visserie, clouterie, aux pièces pour automobile (notamment les bougies), pour chemin de fer et pour installation de lignes électriques.

b) *Cémentation à l'aluminium.*

La cémentation à l'aluminium, appelée **calorisation**, constitue une protection efficace pour des pièces en acier, fonte ou même cuivre, qui doivent supporter des températures élevées (maximum 900°) : pièces pour fours, récupérateurs, réchauffeurs, foyers automatiques, etc.

Les pièces sont placées dans des caisses métalliques et entourées d'un mélange de poudre d'aluminium et de fer. Le traitement s'effectue à 1 000 ou 1 100° ; la couche protectrice peut avoir une profondeur de 1 mm. Comme pour la cémentation au zinc, les pièces doivent, au préalable, être dégraissées et décapées.

c) *Autres cémentations métalliques.*

Les pièces en acier ou en fonte peuvent être protégées par des cémentations au chrome (chromatisation), au nickel, au cadmium. Ces procédés sont peu utilisés industriellement.

2° Altération chimique de la surface.

a) *Oxydation.*

Ce procédé a pour objet la formation, à la surface des pièces, d'une pellicule d'oxyde qui constitue une protection plus ou moins efficace, suivant la nature du métal traité, et présente une teinte agréable.

Le bronzage des armes, le bleuissage et le brunissage de l'acier et de la fonte sont des procédés de protection par oxydation dont l'efficacité est assez illusoire. Par contre, l'oxydation anodique de l'aluminium constitue un procédé beaucoup plus sérieux.

Le bronzage et le bleuissage des aciers comportent un certain nombre d'opérations : dégraissage, oxydation dans un bain de nitrate de soude et de bioxyde de manganèse à 480°, rinçage à l'eau bouillante, puis à l'eau froide, et séchage.

Le bleuissage de la fonte s'obtient en portant les pièces au rouge vif (900°), en les soumettant à une atmosphère alternativement oxydante et réductrice.

b) *Oxydation anodique de l'aluminium.*

L'aluminium est naturellement recouvert d'une couche d'oxyde incolore et transparente de très faible épaisseur : 0,0001 ou 0,0002 mm. Elle assure une protection souvent insuffisante. Aussi a-t-on cherché à la renforcer. On est arrivé, par un procédé électrolytique, l'oxydation anodique, à porter son épaisseur à 0,04 ou 0,06 mm.

a) **Principe de l'opération.**

Les pièces sont immergées dans un bain d'électrolyse contenant de l'acide chromique, de l'acide oxalique ou de l'acide sulfurique. Elles servent d'anode, tandis que la cathode est constituée par des plaques d'aluminium ou de plomb (*fig.* 7).

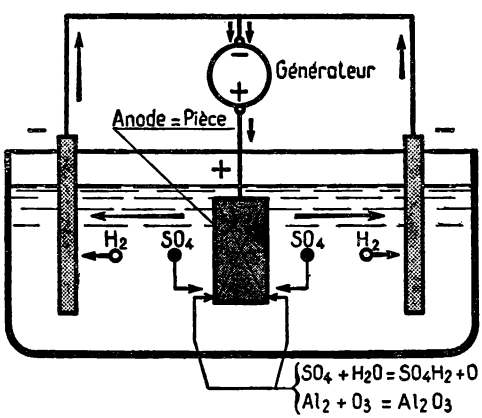


Fig. 7. — Principe de l'oxydation anodique de l'aluminium.

Sur toute la surface des pièces, il y a production d'oxygène naissant. Il en résulte une oxydation, donc formation d'une couche mince étanche d'alumine. L'alumine n'étant pas conductrice, cette couche oppose au courant une résistance appréciable. Si l'on augmente la tension entre anode et cathode, la couche est percée, il se forme un trou très petit ou *pore*. L'électrolyte s'introduit dans ce trou et crée une nouvelle peau d'alumine, là où le pore débouche sur le métal nu. Il se produit un nombre infini de claquages,

donc de pores, qui se recouvrent intérieurement d'une nouvelle pellicule d'oxyde. Ainsi la couche d'alumine pénètre progressivement dans le métal.

Les pièces doivent être, au préalable, dégraissées, décapées et polies.

L'oxydation se fait généralement à 25° ; elle nécessite une tension de 50 volts lorsque le bain contient de l'acide chromique, 30 volts pour l'acide oxalique et 12 volts pour l'acide sulfurique.

La densité du courant est d'environ 1,5 ampère par dm^2. L'opération dure de 30 à 60 mn.

b) **Coloration.**

Il est possible, après oxydation, de faire absorber à la couche d'oxyde des pigments colorés, par immersion dans un bain de teinture porté à 90°.

c) **Fixage.**

Après oxydation ou après teinture, il est nécessaire de réduire la porosité de l'oxyde en immergeant les pièces dans un bain contenant des sels de chrome (oxydation simple) ou de nickel (s'il y a teinture). Cette opération porte le nom de fixage ou *sealing*.

d) **Photographie sur aluminium.**

Après oxydation anodique, on peut faire absorber à la couche poreuse d'oxyde qui recouvre les pièces, des sels sensibles à la lumière. Il suffit d'immerger les pièces dans un bain convenable. Après séchage, la surface extérieure des pièces se comporte comme un papier photographique au bromure que l'on peut impressionner et fixer.

Ce procédé a permis de réaliser l'impression sur aluminium (fabrication de plaques-affiches, de règles à calcul, etc.).

e) **Applications.**

La couche d'oxyde résultant de l'oxydation anodique des alliages d'aluminium est prévue :

— comme *moyen de protection* contre la corrosion : traitement des tôles de duralumin et d'aluminium utilisées en aviation ;

— comme *support de vernis* ou de peinture (pièces d'aviation) ;

— pour *augmenter l'isolement électrique* (fils de bobinage, appareils de chauffage) ;

— pour *augmenter la résistance au frottement* (pistons pour moteurs à explosion) ;

— comme *motif de décoration* lorsqu'elle est colorée.

c) *Phosphatation.*

a) **Principe.**

La phosphatation a pour but de recouvrir les pièces en acier ou en fonte d'une couche de phosphates ferreux ou ferriques. Cette couche, essentielle-

ment poreuse, constitue un excellent support pour une peinture ou une laque et devient ainsi une gaine protectrice contre la corrosion. Il existe différents procédés de phosphatation qui portent des noms différents : **procédé Anox, bondérisation, parkérisation, oïamisation.**

b) **Préparation des pièces.**

Avant de subir le traitement de phosphatation, les pièces doivent être parfaitement dégraissées, décapées (décapage à l'acide et sablage) et rincées à l'eau bouillante.

c) **Mode opératoire.**

La phosphatation est obtenue en immergeant les pièces dans un bain contenant de l'acide phosphorique et des sels de fer, de zinc ou de manganèse.

Une attaque chimique se produit, suivie d'un dégagement d'hydrogène. Il est possible d'ajouter au bain un absorbant d'hydrogène pour éviter le dégagement gazeux.

L'opération se fait à 80 ou 100° et dure environ 30 mn. L'épaisseur de la couche phosphatée est de 0,01 mm.

Après phosphatation, les pièces doivent être rincées à l'eau chaude.

d) **Finition.**

La couche de phosphate qui recouvre la pièce est poreuse comme du buvard. La finition a pour but de lui faire absorber une peinture, une laque, un vernis ou un mélange d'huile et de graisse. L'application de ces produits se fait au pistolet ou par immersion.

e) **Application.**

La phosphatation est un moyen de protection économique qui trouve son application dans l'industrie automobile, l'aviation, l'armement, la marine, etc.

Elle est surtout considérée comme une sous-couche d'accrochage de la peinture et même de l'émail.

d) *Mordançage.*

Le mordançage est une opération chimique que l'on fait subir aux alliages de magnésium pour augmenter leur résistance à la corrosion. Après dégraissage et décapage, les pièces sont immergées pendant deux heures dans un bain porté à 100° et contenant, pour un litre d'eau : 15 cm^3 de bichromate d'ammonium, 5 cm^3 d'ammoniaque à 20°Baumé, 30 g de sulfate d'ammonium, 8 g de bichromate de potasse.

On peut également utiliser un bain à froid comprenant par litre d'eau : 200 g d'acide azotique à 40°Baumé et 170 g de bichromate de potasse.

Une attaque superficielle du magnésium se produit, des sels de couleur jaune se déposent sur toute la surface de la pièce. Cette couche de sels est poreuse et constitue un excellent support à une peinture à l'oxyde de titane ou à une laque.

Le mordançage est utilisé en aviation pour la protection des tôles en alliage de magnésium, qui peuvent ainsi résister, sans oxydation, à l'action de l'air atmosphérique ou de l'eau de mer.

CORROSION DES PIÈCES RECOUVERTES D'UN DÉPOT MÉTALLIQUE

Un dépôt métallique, qui présente des défauts ou qui est poreux, peut être la source d'une oxydation accélérée du métal protégé, comme un rivet de cuivre posé sur une tôle d'acier provoque irrémédiablement la corrosion de l'acier.

Rappelons l'explication de ce phénomène : deux métaux différents plongés dans une solution acide, basique ou saline constituent une pile (*fig.* 8).

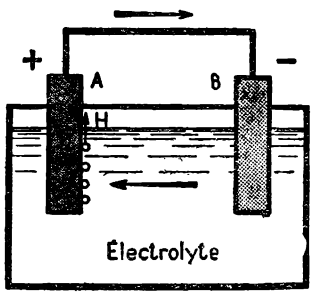


Fig. 8. — Principe d'une pile. En B : attaque du métal ; en A : dégagement d'hydrogène.

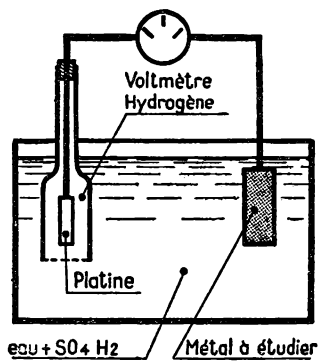


Fig. 9. — Dispositif permettant de mesurer la force électromotrice des différents métaux par rapport à l'hydrogène.

Si on ferme le circuit extérieur il se produit un courant qui va d'un métal **A** à l'autre métal **B**. Le métal **A** est dit « électropositif » par rapport au métal **B**. C'est le métal **B** qui se trouve attaqué tandis que l'hydrogène se dégage en **A**.

On a pu classer les différents métaux en mesurant la force électromotrice existant entre deux électrodes plongées dans une solution acidulée : l'une recouverte d'une gaine protectrice d'hydrogène et l'autre constituée par le métal à étudier (voir *fig.* 9).

L'expérience a donné les résultats suivants :

Or : + 1,08 ;	Nickel : — 0,22 ;
Platine : + 0,87 ;	Cobalt : — 0,23 ;
Argent : + 0,80 ;	Fer : — 0,34 ;
Mercure : + 0,79 ;	Cadmium : — 0,42 ;
Cuivre : + 0,34 ;	Chrome : — 0,47 ;
Hydrogène : 0 ;	Zinc : — 0,77 ;
Plomb : — 0,14 ;	Aluminium : — 1,34 ;
Etain : — 0,15 ;	Magnésium : — 1,70.

La force électromotrice est positive si le courant tend à passer dans le circuit extérieur du métal vers l'hydrogène, et négative dans le cas contraire.

Nous dirons que chaque métal pris sur cette liste est électropositif par rapport à tous ceux qui le suivent (1).

Si, dans de l'eau additionnée de chlorure de sodium, on plonge une lame de cuivre et une lame de fer, le cuivre constitue l'électrode positive de la pile ainsi créée et le fer l'électrode négative (*fig.* 10).

Les ions Na suivent le courant, se portent sur la cathode, et le sodium, retrouvant ses propriétés chimiques, décompose l'eau :

$$Na + H_2O = OHNa + H\nearrow$$

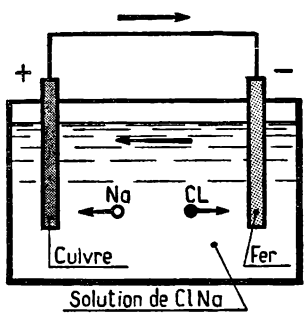


Fig. 10. — Pile constituée par une électrode de cuivre et une électrode de fer.

Sur l'électrode négative, le chlore réagit avec le fer et donne du chlorure ferrique Cl_3Fe soluble. On voit donc que seule l'électrode négative est attaquée.

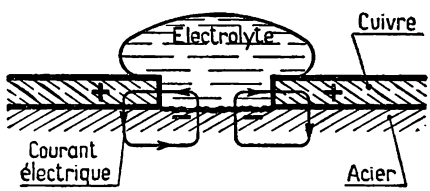


Fig. 11. — Corrosion d'une pièce en acier cuivrée : le fer est attaqué.

Considérons maintenant une pièce en acier recouverte d'une couche de cuivre irrégulièrement répartie. Aux endroits où le fer est à nu, une goutte d'eau qui a dissous du gaz carbonique, des vapeurs acides, des sels, est un électrolyte et constitue avec les deux métaux une véritable pile, dont l'acier est l'électrode négative. La pièce en acier constitue le circuit extérieur de cette pile. L'acier, métal électronégatif, est seul attaqué (*fig.* 11).

(1) Les chimistes, considérant le trajet du courant à l'intérieur de l'électrolyte, classent les métaux dans l'ordre inverse. Ils disent, par exemple, que l'aluminium est plus électropositif que le fer.

Lorsqu'un dépôt de zinc sur le fer présente une solution de continuité, c'est le zinc qui se corrode (*fig.* 12).

De même, si une couche de nickel sur le cuivre est poreuse, la corrosion se porte sur le nickel parce qu'il est électronégatif par rapport au cuivre (*fig.* 13).

Lorsqu'un dépôt d'étain sur le fer présente une solution de continuité, c'est le fer qui se corrode, car l'étain est électropositif par rapport au fer. Ceci explique qu'une pièce en acier étamé se rouille beaucoup plus vite que la même pièce galvanisée (*fig.* 14).

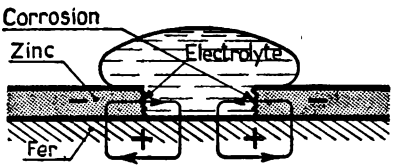


Fig. 12. — Corrosion d'une pièce en acier galvanisée : le zinc est attaqué.

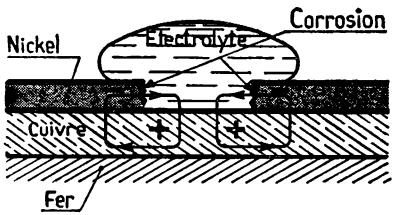


Fig. 13. — Corrosion d'une pièce cuivrée, puis nickelée : le nickel est attaqué.

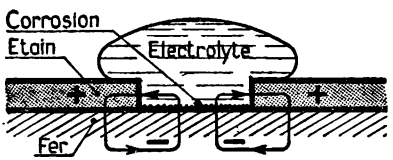


Fig. 14. — Corrosion d'une pièce en acier étamé : le fer est attaqué.

Cette étude montre que pour réaliser une protection efficace, il faut avoir des dépôts métalliques non poreux et recouvrant entièrement les pièces. Ce résultat ne peut être obtenu que si toutes les opérations nécessaires au recouvrement des pièces ont été conduites avec beaucoup de soin.

◇

MÉTROLOGIE

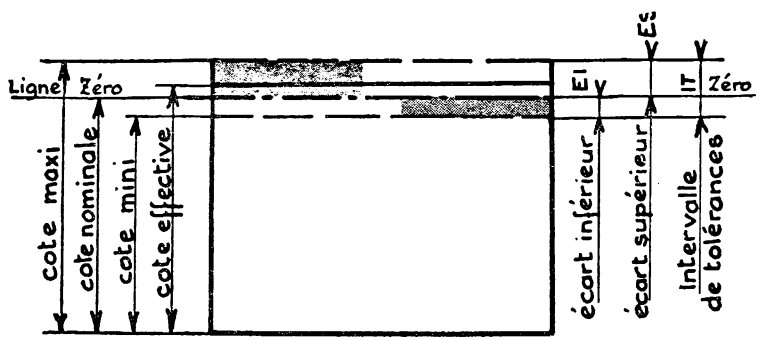


Fig. 1. — Principales caractéristiques résultant de la cotation des éléments.

Métrologie dimensionnelle

SYSTÈME INTERNATIONAL A LIMITES

Un comité comprenant des techniciens de toutes les nations a été chargé de fixer les caractéristiques dimensionnelles des divers ajustements. Ce comité est appelé *International System Organization*, et on le désigne par ses initiales : I. S. O.

Un assemblage dépend :

1° **De la précision d'exécution** de chaque pièce, c'est-à-dire des tolérances de fabrication.

2° **De la position relative** des cotes extrêmes de la pièce femelle par rapport à celles de la pièce mâle (jeu de fonctionnement).

Nous allons étudier les conventions prévues pour la cotation des éléments et, ensuite, les conditions d'assemblage.

A. — Principales caractéristiques résultant de la cotation des éléments

Supposons un élément mâle ou femelle coté $50^{+\ 11}_{-\ 6}$. Les caractéristiques de cet élément sont données sur la *figure* 1.

Cote nominale :

cote de la pièce exprimée par le nombre entier de millimètres. Ici : 50.

Cote effective :

dimension réelle de la pièce réalisée.
Nous supposerons ici : 50,007.

Cote maximum :

dimension maximum que peut avoir la pièce réalisée.
Ici, cote maxi : 50,011.

Cote minimum :

dimension minimum que peut avoir la pièce réalisée.
Ici, cote mini : 50 — 0,006 = 49,994.

Tolérance de fabrication ou intervalle de tolérance IT :

différence entre les cotes maxi et mini.
Ici, nous avons IT = 50,011 — 49,994 = 0,017 = 17 μ.

Écart supérieur ES :

différence algébrique entre la cote maxi et la cote nominale.

Ici, ES = 50,011 — 50 = 0,011 = 11 μ.

Écart inférieur EI :

différence algébrique entre la cote mini et la cote nominale.

Ici, EI = 49,994 — 50 = — 0,006 = — 6 μ.

Remarque. — Pour désigner une cote avec ses tolérances, on écrit la cote nominale et, à sa suite, l'écart supérieur et l'écart inférieur superposés, en microns :

$$C_{EI}^{ES} = 50^{+\,11}_{-\,6}.$$

Ligne zéro :

sur les représentations graphiques, la *ligne zéro* représente le contour de la pièce tracée à la cote nominale.

Relation entre l'intervalle de tolérance IT et les écarts supérieur et inférieur :

On a évidemment : IT = ES — EI.

Reprenons l'exemple précédent : $50^{+\,11}_{-\,6}$.

Nous avons trouvé : IT = 17 μ ; ES = 11 μ ; EI = — 6 μ.

On a bien IT = ES — EI = 11 — (— 6) = 17 μ.

B. — Représentation des tolérances dans le système international I. S. O.

Dans le **système international à limites,** on définit :

1° **La qualité** ou tolérance de fabrication.

2° **La position** des cotes extrêmes de chaque pièce, mâle et femelle, par rapport à la cote nominale (on conditionne ainsi d'une façon très générale les jeux de fonctionnement).

1° Qualité.

Elle définit la tolérance de fabrication, c'est-à-dire l'intervalle de tolérance.

Elle est représentée par un **numéro** de 1 à 11. Plus la tolérance de fabrication est grande, plus le numéro est élevé. Les qualités de 5 à 10 sont les plus employées. Les qualités de 1 à 3 sont réservées à la fabrication des instruments de mesure. Pour une même qualité, les tolérances de fabrication sont d'autant plus importantes que la cote nominale est grande.

Le tableau suivant donne la correspondance, pour quelques qualités, des diamètres exprimés en mm et des intervalles de tolérance exprimés en microns.

Diamètres en mm		de 1 à 3	de 3 à 6	de 6 à 10	de 10 à 18	de 18 à 30	de 30 à 50	de 50 à 80	de 80 à 120	de 120 à 180
Intervalles de tolérance I.T. en microns	Qualité 5...	5	5	6	8	9	11	13	15	18
	Qualité 6...	7	8	9	11	13	16	19	22	25
	Qualité 7...	9	12	15	18	21	25	30	35	40
	Qualité 8...	14	18	22	27	33	39	46	54	63
	Qualité 9...	25	30	36	43	52	62	74	87	100
	Qualité 10...	40	48	58	70	84	100	120	140	160

2° Position des cotes extrêmes par rapport à la cote nominale.

Pour chaque qualité, un certain nombre d'arbres et d'alésages ont été normalisés. Les arbres ou les alésages qui ont la même tolérance de fabrication diffèrent les uns des autres par les écarts existant entre les cotes extrêmes et la cote nominale. Chaque **arbre** est désigné par une **lettre minuscule n, m, k, j, h, g, f, e,** chaque **alésage** par une **lettre majuscule N, M, K, J, H, G, F, E.**

La lettre **h** représente l'arbre dont la cote maximum est égale à la cote nominale.

La lettre **H** représente l'alésage dont la cote minimum est égale à la cote nominale.

— Les **arbres,** dont la position est désignée par une lettre située avant **h** dans la liste alphabétique **a, b, c, d, e, f, g,** ont leur *cote maximum inférieure* à la cote nominale : l'écart supérieur ES est donc *négatif.* La valeur absolue de cet écart diminue quand le symbole de position va de **a** vers **h.**

Pour toutes les autres positions, **i, j, k, m, n...,** le *diamètre maxi* de l'arbre est *supérieur* à la cote nominale ; ES croît avec le rang de la lettre par rapport à **h.**

— Les **alésages,** dont la position est désignée par une lettre située avant **H** dans la liste alphabétique **A, B, C, D, E, F, G,** ont leur *cote minimum supérieure* à la cote nominale. L'écart inférieur EI est *positif.* La valeur de cet écart diminue quand le symbole de position va de **A** vers **H.**

Pour toutes les autres positions, **I, J, K, M, N,...,** le *diamètre minimum* est *inférieur* à la cote nominale ; EI est négatif, et sa valeur absolue croît avec le rang de la lettre symbole de position par rapport à **H.**

Les représentations graphiques des arbres et alésages illustrent cette convention.

Une tolérance d'usinage normalisée se représente par un symbole que l'on écrit après le nombre de cote nominale et qui comprend une lettre (position) suivie d'un chiffre (qualité).

EXEMPLES.

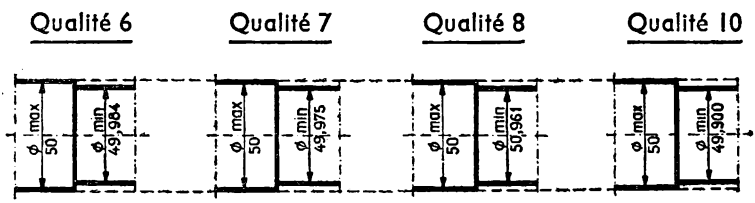
85 g6 pour un arbre et **85 H7** pour un alésage, signifie, si l'on se reporte au tableau de la page 322, que l'arbre a une cote comprise entre 85 — 0,012 = 84,988 et 85 — 0,034 = 84,966, et l'alésage une cote comprise entre 85 et 85,035.

Sur un dessin d'ensemble, lorsqu'on doit coter un ajustement, on fait suivre la cote nominale des symboles de tolérance de l'alésage et de l'arbre : **85 H7 g6.**

Un alésage nécessitant l'emploi d'outils spéciaux : alésoirs, broches de mandrinage, on convient, pour diminuer les frais d'outillage, de n'utiliser en principe que les alésages correspondant à la **position H.** Ils sont appelés **alésages normaux.** Pour réaliser les différents ajustements, il suffit de faire varier la position de l'arbre.

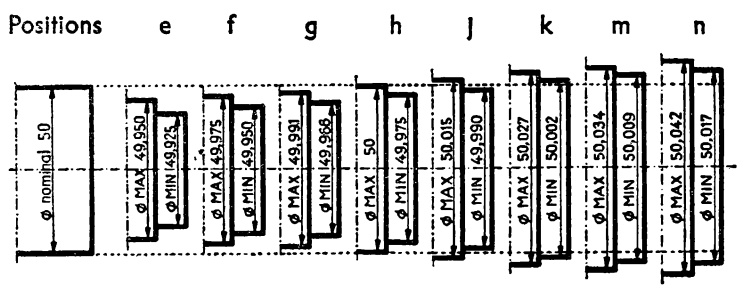
3° Représentation graphique des arbres normalisés.

a) *Mise en évidence de la notion de qualité.*



Les cotes indiquées correspondent à la position **h.**

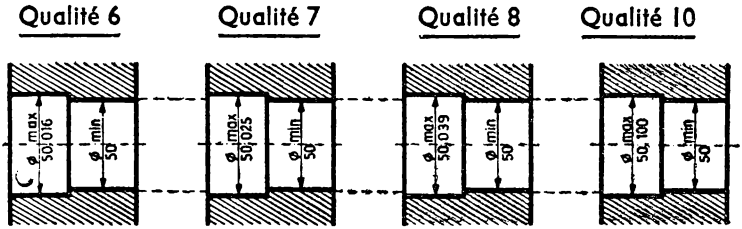
b) *Mise en évidence de la notion de position.*



Les cotes indiquées correspondent à la qualité **7.**

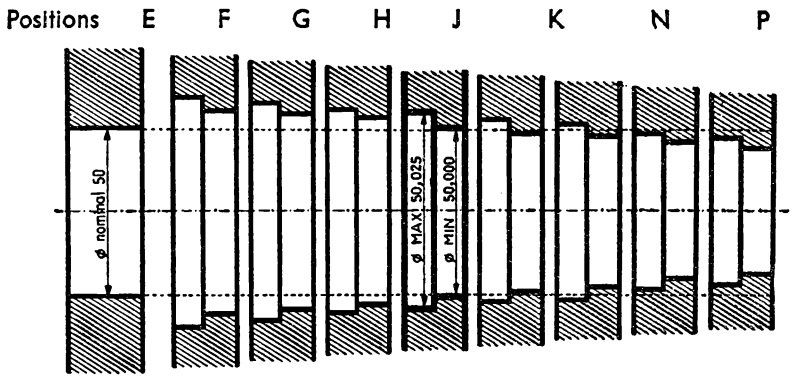
4° Représentation graphique des alésages normalisés.

a) *Mise en évidence de la notion de qualité.*



Les cotes indiquées correspondent à la position **H**.

b) *Mise en évidence de la notion de position.*



Les cotes indiquées correspondent à la qualité 7.

5° Contrôle des pièces.

Le contrôle des pièces se fait au moyen de **vérificateurs à limites** : tampons, jauges, broches, calibres mâchoires.

Ces vérificateurs ont des dimensions fixes. Afin d'éviter les frais d'outillage, il est recommandé de choisir les cotes des parties à assembler parmi les nombres normaux.

Ces nombres normaux constituent les termes des progressions géométriques ayant pour raison $\sqrt[5]{10}$, $\sqrt[10]{10}$, $\sqrt[20]{10}$. On obtient ainsi les séries dites ***séries Renard*** : R*a* 5, R*a* 10, R*a* 20.

SÉRIES DES NOMBRES NORMAUX

| | | |

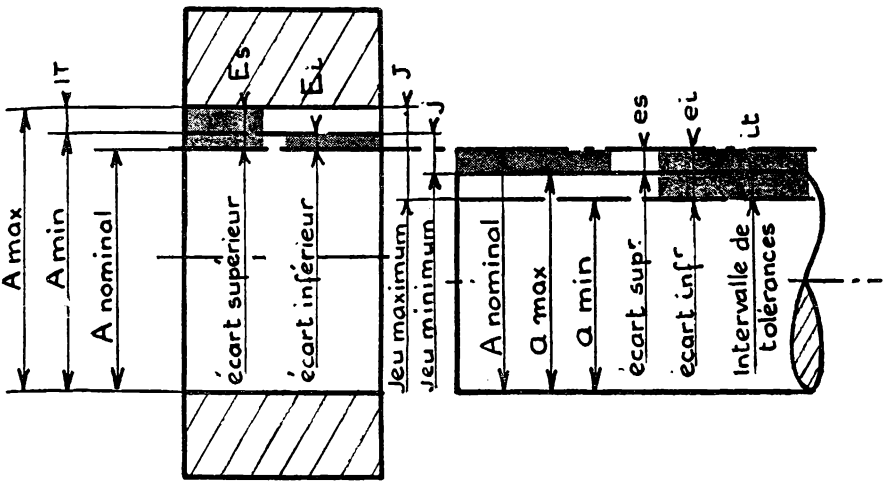


Fig. 2. —Éléments prévus pour un ajustement avec jeu.

Cote minimum : $A_{min} = 60 + EI = 60 + 0{,}010$

$A_{min} = 60{,}010.$

Cote moyenne : $A_{moy} = \dfrac{A_{max} + A_{min}}{2} = \dfrac{A + ES + A + EI}{2}$

$A_{moy} = A + \dfrac{ES + EI}{2} = 60 + \dfrac{0{,}040 + 0{,}010}{2}$

$A_{moy} = 60{,}025.$

Caractéristiques de l'arbre :

Cote maximum : $a_{max} = A + es = 60 + (- 0{,}030)$

$a_{max} = 59{,}970.$

Cote minimum : $a_{min} = A + ei = 60 + (- 0{,}060)$

$a_{min} = 59{,}940.$

Cote moyenne : $a_{moy} = \dfrac{a_{max} + a_{min}}{2} = \dfrac{A + es + A + ei}{2}$

$a_{moy} = A + \dfrac{es + ei}{2} = 60 + \dfrac{(- 0{,}030) + (- 0{,}060)}{2}$

$a_{moy} = 60 - \dfrac{0{,}030 + 0{,}060}{2}$

$= 59{,}955.$

— *Jeu maximum* :

$$J = D_{max}\ \textit{alésage} - D_{min}\ \textit{arbre}$$
$$J = A_{max} - a_{min}$$
$$J = A + ES - (A + ei)$$
$$J = ES - ei$$
$$\downarrow \quad \downarrow$$
$$\textit{alésage} \quad \textit{arbre}$$
$$J = 40 - (-60) = 100\,\mu.$$

— *Jeu mini* :

$$j = D_{min}\ \textit{alésage} - D_{max}\ \textit{arbre}$$
$$j = A + EI - (A + es)$$
$$j = EI - es = 10 - (-30) = 40\,\mu.$$

— *Jeu moyen* :

$$D_{moy}\ \textit{alésage} - D_{moy}\ \textit{arbre}$$
$$= A + \frac{ES + EI}{2} - \left(A + \frac{es + ei}{2}\right)$$
$$= \frac{ES + EI}{2} - \frac{es + ei}{2}$$
$$= \frac{40 + 10}{2} - \frac{-30 - 60}{2} = 25 + 45 = 70\,\mu.$$

2° Ajustement avec serrage.

Le serrage peut être considéré comme un jeu négatif.

La cote mini de l'arbre est supérieure à la cote maxi de l'alésage. Conservons les mêmes notations que précédemment.

Considérons l'ajustement **40 H7 p6.**

Alésage :

Diamètre : 40^{+25}_{+0}
Écarts : ES = 25, EI = 0.

Arbre :

Diamètre : 40^{+42}_{+26}
Écarts : *es* = 42, *ei* = 26.

— *Jeu maxi* : $J = ES - ei$
$= 25 - 26 = -1 =$ serrage mini.

Le serrage est un jeu négatif.

— *Jeu mini* : $j = EI - es$
$= 0 - 42 = -42 =$ serrage maxi.

— *Jeu moyen* :

$$= \frac{ES + EI}{2} - \frac{es + ei}{2}$$

$$= \frac{25 + 0}{2} - \frac{42 + 26}{2} = -21{,}5 = \text{serrage moyen.}$$

3° Ajustement incertain.

Considérons l'ajustement **40 H7 n6.**

Alésage :

Diamètre : 40^{+25}_{+0}
Ecarts : ES = 25, EI = 0.

Arbre :

Diamètre : 40^{+33}_{+17}
Ecarts : *es* = 33, *ei* = 17.

— *Jeu maxi* :

$$J = ES - ei$$
$$= 25 - 17 = 8.$$

— *Jeu mini* :

$$j = EI - es$$
$$= 0 - 33 = -33 = \text{serrage.}$$

— *Jeu moyen* :

$$= \frac{ES + EI}{2} - \frac{es + ei}{2}$$

$$= \frac{25 + 0}{2} - \frac{33 + 17}{2} = -12{,}5 = \text{serrage.}$$

Ainsi, dans la majorité des cas, on aura un ajustement avec serrage. Mais on pourra cependant avoir dans quelques cas un ajustement avec jeu.

Remarque.

Dans tous les cas, on a la relation algébrique :

$$\textit{jeu moyen} = \frac{\text{jeu maxi} + \text{jeu mini}}{2}.$$

DIAMÈTRES en mm		Alésages normaux				Arbres									
		H_6	H_7	H_8	H_{11}	g_5	h_5	k_5	g_6	h_6	j_6	k_6	m_6	n_6	p_6
de 1 à 3	max.	+ 7	+ 9	+ 14	+ 60	− 3	0		− 3	0	+ 6		+ 9	+ 13	+ 16
	min.	0	0	0	0	− 8	− 5		− 10	− 7	− 1		+ 2	+ 6	+ 9
de 3 à 6	max.	+ 8	+ 12	+ 18	+ 75	− 4	0		− 4	0	+ 7		+ 12	+ 16	+ 20
	min.	0	0	0	0	− 9	− 5		− 12	− 8	− 1		+ 4	+ 8	+ 12
de 6 à 10	max.	+ 9	+ 15	+ 22	+ 90	− 5	0	+ 7	− 5	0	+ 7	+ 10	+ 15	+ 19	+ 24
	min	0	0	0	0	− 11	− 6	+ 1	− 14	− 9	− 2	+ 1	+ 6	+ 10	+ 15
de 10 à 14	max.	+ 11	+ 18	+ 27	+ 110	− 6	0	+ 9	− 6	0	+ 8	+ 12	+ 18	+ 23	+ 29
	min.	0	0	0	0	− 14	− 8	+ 1	− 17	− 11	− 3	+ 1	+ 7	+ 12	18
de 14 à 18	max.	+ 11	+ 18	+ 27	+ 110	− 6	0	+ 9	− 6	0	+ 8	+ 12	+ 18	+ 23	+ 29
	min.	0	0	0	0	− 14	− 8	+ 1	− 17	− 11	− 3	+ 1	+ .7	+ 12	+ 18
de 18 à 24	max.	+ 13	+ 21	+ 33	+ 130	− 7	0	+ 11	− 7	0	+ 9	+ 15	+ 21	+ 28	+ 35
	min.	0	0	0	0	− 16	− 9	+ 2	− 20	− 13	− 4	+ 2	+ 8	+ 15	+ 22
de 24 à 30	max.	+ 13	+ 21	+ 33	+ 130	− 7	0	+ 11	− 7	0	+ 9	+ 15	+ 21	+ 28	+ 35
	min.	0	0	0	0	− 16	− 9	+ 2	− 20	− 13	− 4	+ 2	+ 8	+ 15	+ 22
de 30 à 40	max.	+ 16	+ 25	+ 39	+ 160	− 9	0	+ 13	− 9	0	+ 11	+ 18	+ 25	+ 33	+ 42
	min.	0	0	0	0	− 20	− 11	+ 2	− 25	− 16	− 5	+ 2	+ 9	+ 17	+ 26
de 40 à 50	max.	+ 16	+ 25	+ 39	+ 160	− 9	0	+ 13	− 9	0	+ 11	+ 18	+ 25	+ 33	+ 42
	min.	0	0	0	0	− 20	− 11	+ 2	− 25	− 16	− 5	+ 2	+ 9	+ 17	+ 26
de 50 à 65	max.	+ 19	+ 30	+ 46	+ 190	− 10	0	+ 15	− 10	0	+ 12	+ 21	+ 30	+ 39	+ 51
	min.	0	0	0	0	− 23	− 13	+ 2	− 29	− 19	− 7	+ 2	+ 11	+ 20	+ 32
de 65 à 80	max.	+ 19	+ 30	+ 46	+ 190	− 10	0	+ 15	− 10	0	+ 12	+ 21	+ 30	+ 39	+ 51
	min.	0	0	0	0	− 23	− 13	+ 2	− 29	− 19	− 7	+ 2	+ 11	+ 20	+ 32
de 80 à 100	max.	+ 22	+ 35	+ 54	+ 220	− 12	0	+ 18	− 12	0	+ 13	+ 25	+ 35	+ 45	+ 59
	min.	0	0	0	0	− 27	− 15	+ 3	− 34	− 22	− 9	+ 3	+ 13	+ 23	+ 37
de 100 à 120	max.	+ 22	+ 35	+ 54	+ 220	− 12	0	+ 18	− 12	0	+ 13	+ 25	+ 35	+ 45	+ 59
	min.	0	0	0	0	− 27	− 15	+ 3	− 34	− 22	− 9	+ 3	+ 13	+ 23	+ 37
de 120 à 140	max.	+ 25	+ 40	+ 63	+ 250	− 14	0	+ 21	− 14	0	+ 14	+ 28	+ 40	+ 52	+ 68
	min.	0	0	0	0	− 32	− 18	+ 3	− 39	− 25	− 11	+ 3	+ 15	+ 27	+ 43
de 140 à 160	max.	+ 25	+ 40	+ 63	+ 250	− 14	0	+ 21	− 14	0	+ 14	+ 28	+ 40	+ 52	+ 68
	min.	0	0	0	0	− 32	− 18	+ 3	− 39	− 25	− 11	+ 3	+ 15	+ 27	+ 43
de 160 à 180	max.	+ 25	+ 40	+ 63	+ 250	− 14	0	+ 21	− 14	0	+ 14	+ 28	+ 40	+ 52	+ 68
	min.	0	0	0	0	− 32	− 18	+ 3	− 39	− 25	− 11	+ 3	+ 15	+ 27	+ 43
de 180 à 200	max.	+ 29	+ 46	+ 72	+ 290	− 15	0	+ 24	− 15	0	+ 16	+ 33	+ 46	+ 60	+ 79
	min.	0	0	0	0	− 35	− 20	+ 4	− 44	− 29	− 13	+ 4	+ 17	+ 31	+ 50

Les intervalles prévus pour les diamètres vont de la cote minimum exclue à la cote maximum incluse.

A LIMITES I. S. O.

Arbres									Alésages pour roulements					
e_7	f_7	h_7	s_7	x_7	f_8	h_8	d_{10}	d_{11}	J_6	K_7	N_7	P_7	DIAMÈTRES en mm	
− 14	− 7	− 0	+ 24	+ 31	− 7	0	− 20	− 20					max.	de 1 à 3
− 23	− 16	− 9	+ 15	+ 22	− 21	− 14	− 60	− 80					min.	
− 20	− 10	0	+ 31	+ 40	− 10	0	− 30	− 30					max.	de 3 à 6
− 32	− 22	− 12	+ 19	+ 28	− 28	− 18	− 78	−105					min.	
− 25	− 13	0	+ 38	+ 49	− 13	0	− 40	− 40					max.	de 6 à 10
− 40	− 28	− 15	+ 23	+ 34	− 35	− 22	− 98	−130					min.	
− 32	− 16	0	+ 46	+ 58	− 16	0	− 50	− 50	+ 6	+ 6	− 5	− 11	max.	de 10 à 14
− 50	− 34	− 18	+ 28	+ 40	− 43	− 27	−120	−160	− 5	− 12	− 23	− 29	min.	
− 32	− 16	0	+ 46	+ 63	− 16	0	− 50	− 50	+ 6	+ 6	− 5	− 11	max.	de 14 à 18
− 50	− 34	− 18	+ 28	+ 45	− 43	− 27	−120	−160	− 5	− 12	− 23	− 29	min.	
− 40	− 20	0	+ 56	+ 75	− 20	0	− 65	− 65	+ 8	+ 6	− 7	− 14	max.	de 18 à 24
− 61	− 41	− 21	+ 35	+ 54	− 53	− 33	−149	−195	− 5	− 15	− 28	− 35	min.	
− 40	− 20	0	+ 56	+ 85	− 20	0	− 65	− 65	+ 8	+ 6	− 7	− 14	max.	de 24 à 30
− 61	− 41	− 21	+ 35	+ 64	− 53	− 33	−149	−195	− 5	− 15	− 28	− 35	min.	
− 50	− 25	0	+ 68	+105	− 25	0	− 80	− 80	+ 10	+ 7	− 8	− 17	max.	de 30 à 40
− 75	− 50	− 25	+ 43	+ 80	− 64	− 39	−180	−240	− 6	− 18	− 33	− 42	min.	
− 50	− 25	0	+ 68	+122	− 25	0	− 80	− 80	+ 10	+ 7	− 8	− 17	max.	de 40 à 50
− 75	− 50	− 25	+ 43	+ 97	− 64	− 39	−180	−240	− 6	− 18	− 33	− 42	min.	
− 60	− 30	0	+ 83	+152	− 30	0	−100	−100	+ 13	+ 9	− 9	− 21	max.	de 50 à 65
− 90	− 60	− 30	+ 53	+122	− 76	− 46	−220	−290	− 6	− 21	− 39	− 51	min.	
− 60	− 30	0	+ 89	+176	− 30	0	−100	−100	+ 13	+ 9	− 9	− 21	max.	de 65 à 80
− 90	− 60	− 30	+ 59	+146	− 76	− 46	−220	−290	− 6	− 21	− 39	− 51	min.	
− 72	− 36	0	+106	+213	− 36	0	−120	−120	+ 16	+ 10	− 10	− 24	max.	de 80 à 100
−107	− 71	− 35	+ 71	+178	− 90	− 54	260	−340	− 6	− 25	− 45	− 59	min.	
− 72	− 36	0	+114	+245	− 36	0	−120	−120	+ 16	+ 10	− 10	− 24	max.	de 100 à 120
−107	− 71	− 35	+ 79	+210	− 90	− 54	−260	−340	− 6	− 25	− 45	− 59	min.	
− 85	− 43	0	+132	+288	− 43	0	−145	−145	+ 18	+ 12	− 12	− 28	max.	de 120 à 140
−125	− 83	− 40	+ 92	+248	−106	− 63	−305	−395	− 7	− 28	− 52	− 68	min.	
− 85	− 43	0	+140	+320	− 43	0	−145	−145	+ 18	+ 12	− 12	− 28	max.	de 140 à 160
−125	− 83	− 40	+100	+280	−106	− 63	−305	−395	− 7	− 28	− 52	− 68	min.	
− 85	− 43	0	+148	+350	− 43	0	−145	−145	+ 18	+ 12	− 12	− 28	max.	de 160 à 180
−125	− 83	− 40	+108	+310	−106	− 63	−305	−395	− 7	− 28	− 52	− 68	min.	
−100	− 50	0	+168	+396	− 50	0	−170	−170	+ 22	+ 13	− 14	− 33	max.	de 180 à 200
− 46	− 96	− 46	+122	+350	−122	− 72	−355	−460	− 7	− 33	− 60	− 79	min.	

Exemple, — Intervalle de 40 à 50 = de 40 exclu à 50 inclus.

Ajustements recommandés

1° Ajustements pièces immobiles l'une par rapport à l'autre.

		H6	H7	H8	H11
Ajustement libre : très libre				*d*10	*d*11
libre				*f*8	
Centrage précis : moyeux clavetés			*h*6 *h*7	*h*8	
Centrage très précis pour outillage		*h*5			
Centrage précis légèrement dur			*j*6		
Immobilisation en rotation sans transmission d'efforts	acier/acier		*m*6		
Montage et démontage sans détérioration au maillet	acier/bronze ou aluminium		*n*6		
Immobilisation avec transmission d'efforts axiaux	acier/acier		*p*6		
Montage à la presse ou par dilatation ou retrait de l'un des éléments	acier/acier		*s*7		
Démontage avec détérioration des pièces assemblées	acier/bronze ou aluminium			*x*7	

2° Ajustements pièces mobiles l'une par rapport à l'autre.

	H6	H7	H8	H11
Ajustement glissant ou tournant librement. Précision faible				*d*11
Ajustement glissant ou tournant. Précision moyenne			*f*8	
Ajustement glissant ou tournant dans une bague ou un coussinet. Bonne précision :				
— Charge élevée, possibilité de dilatation, longue portée, vitesse élevée, risque d'erreur d'alignement		*e*7		
— Peu de risque de dilatation, bon graissage ou vitesse réduite		*f*7		
Ajustement précis glissant, vitesse modérée		*g*6		
Ajustement très précis glissant, vitesse faible ; outillage seulement	*g*5			

3° Ajustements pour roulements à billes ou à rouleaux.

	ARBRE	LOGEMENT BAGUE EXTÉRIEURE
a) ***Arbre tournant.***		
En principe, la bague intérieure est serrée sur l'arbre.		
La bague extérieure peut se déplacer latéralement :		
— roulements à billes non bloqués latéralement		
— roulements à rouleaux coniques, réglage par bague extérieure.		
Centrage moyen, charge moyenne / charge élevée	*k*6 / *m*6	H6 ou H7
Centrage précis, charge moyenne / charge élevée	*k*6 / *m*6	J6
La bague extérieure n'a pas à se déplacer latéralement. Un freinage contre la rotation de la bague extérieure dans le logement est souhaitable	*k*6	K6 ou K7
b) ***Logement tournant.***		
En principe, la bague extérieure est serrée dans le logement		
Réglage par la bague intérieure		
Roulements à rouleaux cylindrique et conique		
Charges élevées	*h*6	P7
Roulements à billes et roulements à rouleaux		
Charges légères	*h*6	N7

APPARIEMENT (1) DES PIÈCES

En construction mécanique moderne, on est quelquefois conduit à réaliser l'assemblage de pièces avec des jeux de fonctionnement très faibles, de l'ordre du millième de millimètre.

Tel est, par exemple, le cas des ensembles cylindre et piston des pompes d'injection pour moteurs Diesel, qui compriment le combustible à une pression souvent supérieure à 2 000 N/cm².

L'exécution en série des cylindres et des pistons, garantissant l'interchangeabilité des pièces, conduirait à fixer des tolérances de fabrication extrêmement serrées.

Si l'on suppose un diamètre nominal de 12, on aurait : alésage du cylindre 12^{+2}_{+1} ; diamètre du piston 12^{0}_{-1}.

— Jeu moyen de fonctionnement : 2 microns.
— Jeu maximum de fonctionnement : 3 microns.
— Jeu minimum de fonctionnement : 1 micron.

(1) Action de mettre par paire.

L'exécution des pièces avec une telle précision serait très difficile, onéreuse, et conduirait à des rebuts importants.

Rompant avec les règles strictes de l'interchangeabilité, les constructeurs ont préféré fixer des tolérances d'usinage plus importantes, permettant d'usiner des pièces sans précautions spéciales.

L'alésage du cylindre est pris, par exemple, égal à 12^{+2}_{+7} et le diamètre du piston à 12^{+5}_{+0}.

Les différentes pièces usinées sont mesurées au micromètre pneumatique Solex de précision et classées par diamètre dans des casiers.

Cylindres alésés à :

12,002 — 12,003 — 12,004 — 12,005 — 12,006 — 12,007.

Pistons aux diamètres de :

12,000 — 12,001 — 12,002 — 12,003 — 12,004 — 12,005.

Pour constituer les pompes, on assemblera :

les cylindres de 12,002 avec les pistons de 12,000,
— de 12,003 — 12,001,
— de 12,004 — 12,002, etc.

On aura ainsi des ensembles dont le jeu de fonctionnement sera rigoureusement égal à 2 microns, et les pompes montées de la sorte donneront des résultats très constants. L'expérience a montré que le nombre de pièces inutilisables est très faible.

ÉTUDE DE LA COTATION DES PIÈCES

A. — Cotes fonctionnelles — Cotes résultantes

1° Supposons une pièce dont l'étude fonctionnelle a permis de déterminer les formes représentées sur la *figure* 3. Les cotes fonctionnelles de position des axes sont A et B. Ces cotes comportent des tolérances :

$$A^{esa}_{eia} = 50^{+40}_{+10} \quad \text{et} \quad B^{esb}_{eib} = 20^{+20}_{-5}.$$

A = 50 et B = 20 sont les *cotes nominales* ;

esa = + 40 μ et *eia* = + 10 μ sont les *écarts supérieur et inférieur* de la cote A, tandis que *esb* = 20 μ et *eib* = — 5 μ sont les écarts supérieur et inférieur de la cote B.

Si nous voulons placer la cote C, nous la considérons comme la cote résultante de A et B, et nous l'écrirons entre parenthèses.

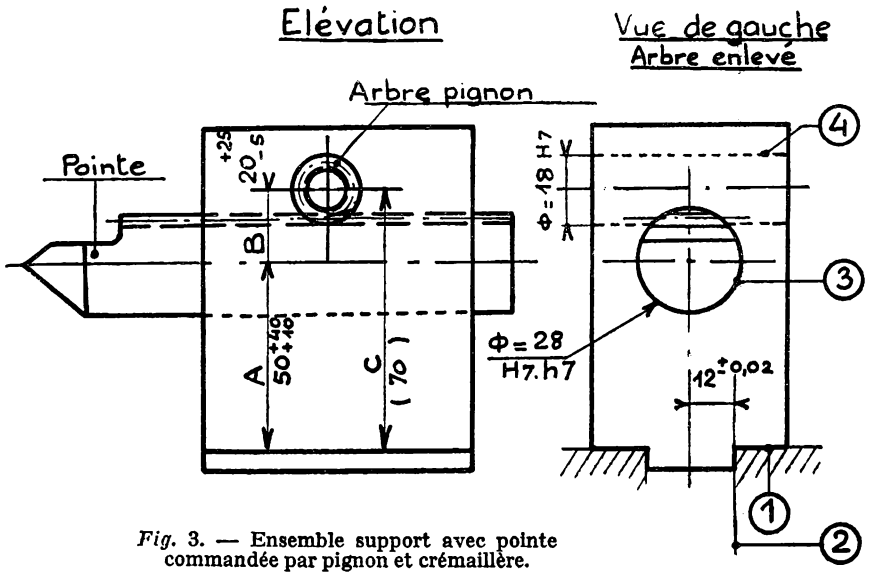


Fig. 3. — Ensemble support avec pointe commandée par pignon et crémaillère.

Calculons la cote C et ses tolérances :

Cote nominale. On a évidemment :

$$C = A + B = 50 + 20 = 70.$$

Valeur maximum de C. On a évidemment :

$$C_{max} = A_{max} + B_{max}.$$

Soit :

$$C_{max} = A + esa + B + esb$$

$$C + esc = A + B + esa + esb = C + esa + esb$$

d'où l'on tire :

$$\mathbf{esc = esa + esb = 40 + 20 = + 60\,\mu.}$$

Valeur minimum de C.

$$C_{min} = A_{min} + B_{min}$$

$$C + eic = A + eia + B + eib$$

$$C + eic = A + B + eia + eib = C + eia + eib$$

d'où :

$$\mathbf{eic = eia + eib = 10 - 5 = + 5\,\mu.}$$

La cote C, avec ses tolérances, est donc :

$$C_{eic}^{esc} = C_{eia+eib}^{esa+esb} = 70^{+60}_{+5}.$$

Remarque. — Reprenons les relations :

$$esc = esa + esb \quad (1)$$

$$eic = eia + eib. \quad (2)$$

Retranchons (2) de (1), il vient :

$$esc - eic = esa - eia + esb - eib$$

$$\mathbf{ITC = ITA + ITB = 30 + 25 = + 55\,\mu.}$$

On peut donc énoncer la règle suivante :

L'intervalle de tolérance de la cote résultante est égal à la somme des intervalles de tolérance des cotes composantes :

IT cote résultante = Σ des IT des cotes composantes.

2° Supposons qu'en fabrication, on décide de réaliser l'usinage correspondant à la cote C, puis l'usinage correspondant à la cote B.

Nous allons montrer que les tolérances qui viennent d'être calculées pour la cote C, considérée comme la résultante de A et B, ne peuvent être données à l'ouvrier chargé d'exécuter la pièce.

Il est évident que *les cotes fonctionnelles A et B seront les seules cotes vérifiées par le contrôleur.* Les tolérances à respecter sont donc celles de A et B.

Puisque l'ouvrier mesure B et C, il faut considérer A comme la résultante de B et C.

On aura donc :

$$A = C - B = 70 - 20 = 50.$$

Déterminons, dans ce cas, les tolérances à prévoir pour C.

Calculons C_{max}.

On a :

$$A_{max} = C_{max} - B_{min}$$

$$A + esa = C + esc - (B + eib)$$

ou $$A + esa = C - B + esc - eib = A + esc - eib$$

d'où l'on tire :

$$esa = esc - eib$$

et, par suite :

$$\mathbf{esc = esa + eib = 40 - 5 = + 35\,\mu.}$$

Calculons C_{min}.

On a :

$$A_{min} = C_{min} - B_{max}$$

$$A + eia = C + eic - (B + esb)$$

$$A + eia = C - B + eic - esb = A + eic - esb$$

d'où : $eia = eic - esb$

d'où : $\mathbf{eic = eia + esb = 10 + 20 = + 30\,\mu.}$

Il faudra donc donner à l'ouvrier une cote C, assortie de ses tolérances, qui aura pour valeur :

$$C_{eic}^{esc} = 70^{+35}_{+30}.$$

L'intervalle de tolérance est de $35 - 30 = + 5\,\mu$.

Pour calculer ITC, on aurait pu appliquer la relation :

IT cote résultante = Σ des IT des cotes composantes.

Soit : $ITA = ITB + ITC,$

soit : $ITC = ITA - ITB = 30 - 25 = 5\mu.$

La difficulté d'exécution de la cote C est évidente, étant donnée la grande précision imposée.

On se trouve dans l'obligation de réviser la méthode de fabrication et de considérer que les cotes fonctionnelles A et B sont aussi des cotes de fabrication.

La gamme des opérations doit être modifiée ; il faut prévoir :

a) les *opérations d'ébauche*, dont l'ordre est fonction des possibilités des machines et des outils, de la rapidité d'exécution, de la moindre déformation de la pièce ;

b) les *opérations de finition*, dont l'ordre dépend uniquement des cotes fonctionnelles.

L'usinage se fera comme suit, en finition :

1° Finition de 1 et 2.

2° Alésage de 3 : la position de l'outil sera déterminée à partir de 1 et 2.

3° Alésage de 4 : la position de l'outil sera déterminée à partir de 3.

Il est possible de multiplier les exemples : on arrive toujours aux mêmes constatations.

Les conclusions qui s'imposent sont donc les suivantes :

l'analyse fonctionnelle, qui permet d'établir un dessin de définition du produit fini, met aussi en évidence que :

— les surfaces de départ d'usinage sont toujours des surfaces fonctionnelles (surface de référence) ;

— les cotes de fabrications pour la finition sont, dans la majeure partie des cas, les cotes fonctionnelles.

B. — Chaîne fermée de tolérances

Les seules cotes à porter sur les dessins sont celles qui permettent de réaliser uniquement des pièces bonnes : ceci est évident.

Reprenons l'exemple précédent, en supposant que l'on ait placé les tolérances sans indiquer quelle est la cote résultante (*fig.* 4).

Imaginons que l'on ait choisi les cotes B et C comme cotes de fabrication.

Calculons l'intervalle et la position des tolérances de A, qui est ici considérée comme cote résultante.

On a : $A = C - B.$

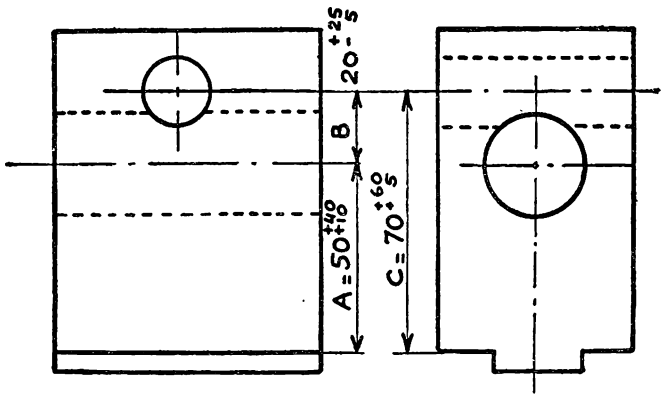


Fig. 4. — Mauvaise cotation du support.

a) *Intervalle de tolérances.*

Appliquons la règle

IT résultante = Σ IT des composantes.

On a : $ITA = ITC + ITB$

soit : $ITA = 55 + 25 = + 80\,\mu.$

L'intervalle ITA est beaucoup trop grand puisque, pour assurer un fonctionnement correct, il ne peut être que de $30\,\mu$.

b) *Position des tolérances.*

Nous nous proposons de déterminer *esa* et *eia*, qui définissent la cote A^{esa}_{eia}.

Calcul de l'écart supérieur de A : *es*A.

On a :

$$A_{max} = C_{max} - B_{min}$$

ce qui donne :

$$esa = esc - eib$$

ou :

$$esa = 60 - (-5) = + 65\,\mu.$$

Calcul de l'écart inférieur de A : *ei*A.

On a :

$$A_{min} = C_{min} - B_{max}$$

ce qui donne :

$$eia = eic - esb$$

ou :

$$eia = 5 - 20 = -15\,\mu.$$

La cote obtenue pour A est donc :

$$A_{eia}^{esa} = 50^{+65}_{-15}.$$

C'est elle qui donnera lieu à des décisions d'acceptation ou de refus des pièces. Elle est différente de la cote de définition 50^{+40}_{+10}.

Ainsi, en choisissant B et C comme cotes de fabrication, on produira des pièces :

mauvaises, si A est comprise entre 50,065 et 50,040 ;

bonnes, si A est comprise entre 50,040 et 50,010 ;

mauvaises, si A est comprise entre 50,010 et 49,985.

C. — Généralisation

La cotation fonctionnelle peut utilement s'exprimer par une relation vectorielle. Une chaîne de cotes fermée doit mettre en évidence la cote résultante A représentée par deux traits parallèles, et les cotes composantes B et C représentées par des vecteurs simples disposés l'un à la suite de l'autre. Le vecteur cote résultante $\vec{A}$ occupe la même disposition que le vecteur résultant des vecteurs composants $\vec{B}$ et $\vec{C}$:

$$\vec{A} = \vec{B} + \vec{C} \quad (\textit{fig.}\ 5).$$

Sur les dessins de définition, il faut proscrire toute cotation surabondante. Si, par exemple, sur une pièce existante prismatique (*fig.* 6), l'étude fonctionnelle exige la présence d'une entaille définie par les cotes A et C assorties de tolérances (*fig.* 7), la cote B portée sur la *figure* 5 est surabondante.

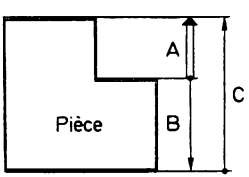


Fig. 5.

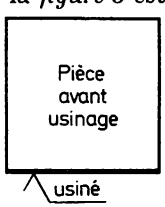


Fig. 6.

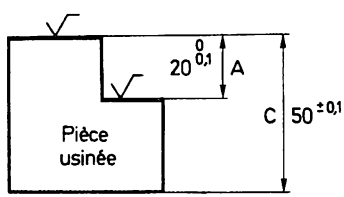


Fig. 7.

La surface de base de la pièce est supposée usinée : c'est une surface de référence destinée à situer la pièce sur la machine.

1° Étude critique des méthodes d'usinage en série.

Première méthode On réalise successivement sur deux machines la cote C puis la cote A.

— La réalisation de C (*fig.* 8) est obtenue par réglage de l'outil (fraise par exemple) à partir de la face d'appui de la pièce sur le montage d'usinage. La cote C est appelée *cote machine.* On peut ainsi bénéficier, pour le réglage, de tout l'intervalle de tolérance prévu pour C : ITC = 0,2

— La réalisation de la cote A (*fig.* 9) se fera en prenant pour surface de départ celle qui vient d'être usinée et qui viendra en contact avec un montage conçu à cet effet. Le réglage de l'outil se fera à partir de ce montage fixe sur la machine. La cote A est encore une cote machine. On dispose, pour le réglage, de tout l'intervalle de tolérance prévu sur la cote A : ITA = 0,1.

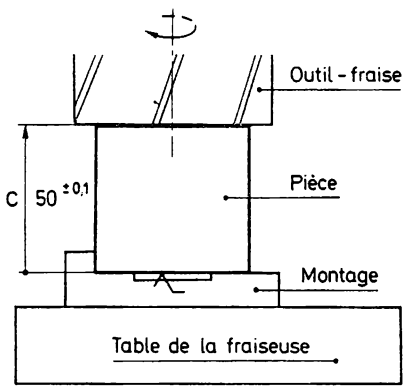


Fig. 8.

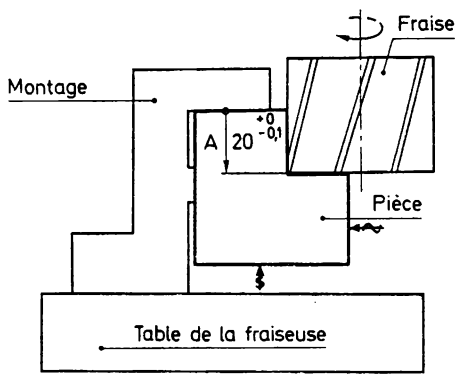


Fig. 9.

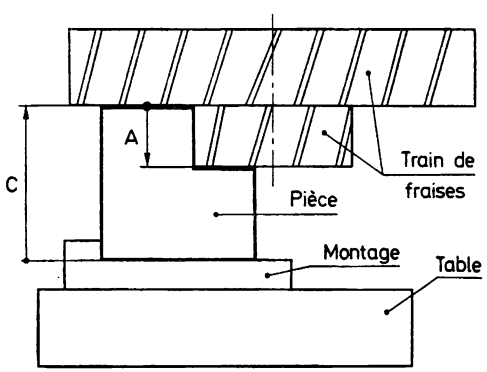


Fig. 10.

Deuxième méthode : La réalisation des cotes C et A est simultanée (*fig.* 10) avec un train de fraises conçu à cet effet.

— La cote C est une cote machine. Pour le réglage, on dispose de ITC = 0,2.

— La cote A est une cote outil. Pour la réalisation du train de fraises et l'affûtage, on dispose de ITA = 0,1.

Troisième méthode : On veut faire l'usinage en deux opérations séparées, en utilisant le même montage (*fig.* 11).

En première opération, on réalise la cote C et en seconde opération la cote B

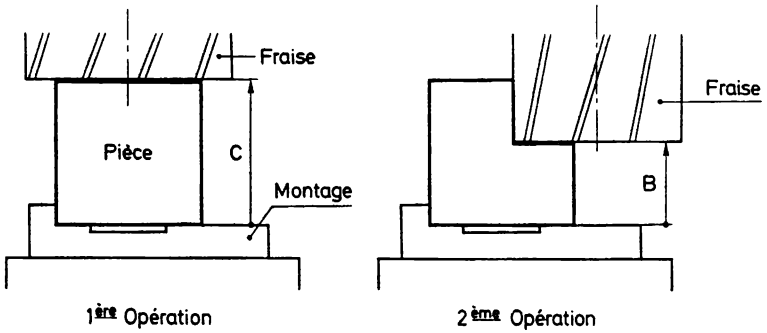


Fig. 11.

Ainsi, la cote A est la résultante de C et de B. Traçons la représentation vectorielle (*fig.* 12). On peut écrire :

$$\vec{A} = \vec{C} + \vec{B}.$$

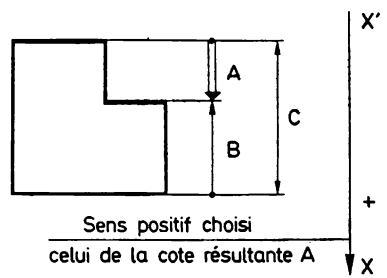


Fig. 12.

Si on donne au vecteur $\vec{A}$ le sens du haut vers le bas, les sens de $\vec{C}$ et $\vec{B}$ se trouvent définis en conformité avec les règles de la géométrie vectorielle.

Soit un axe XX', axe orienté parallèle aux vecteurs cotes dont les modules sont A, B, C. Leur projection sur XX' donne : A = C + (— B) ou A = C — B.

L'examen de la figure donne :

$$A_{max} = C_{max} - B_{min}$$
$$A_{min} = C_{min} - B_{max}$$

soit en généralisant :

(1) max cote résult. = Σ max cotes de même sens — Σ min cotes sens contr.

(2) min cote résult. = Σ min cotes de même sens — Σ max cotes sens contr.

La référence aux études précédentes permet d'écrire :

(3) IT cote résult. = Σ IT cotes composantes.

Ces trois relations sont essentielles au calcul des cotes. Appliquons-le à la résolution du problème. Rappelons les données : $A = 20^{\pm 0}_{0,1}$ et $C = 50^{\pm 0,1}$.

$A = C - B$ donne $B = C - A = 50 - 20 = 30$.

Relation (3) $ITA = ITC + ITB$

ou $0,1 = 0,2 + ITB$

équation qui donnerait pour ITB une valeur négative, ce qui est inconcevable.

Le concepteur de la pièce doit décider du choix à faire : quel est, de ITA et de ITC, celui qui doit être conservé? Supposons que $ITA = 0,1$ soit exigé. Il faut répartir $ITA = 0,1$ sur les cotes C et B. Des considérations d'usinage peuvent nous conduire à faire $ITC = 0,05$ et $ITB = 0,05$.

Il faudra disposer $ITC = 0,05$ dans la fourchette $50^{+0,1}$ et $50^{-0,1}$ et admettre par exemple que $C = 50^{\pm 0,025}$.

Le calcul de la cote B se fera en utilisant les relations (1) et (2) :

(1) $$20 = 50,025 - B_{min}$$
$$B_{min} = 50,025 - 20 = 30,025$$

(2) $$(20 - 0,1) = (50 - 0,025) - B_{max}$$
$$B_{max} = 50 - 0,025 - (20 - 0,1)$$
$$= 30 + 0,1 - 0,025 = 30,075$$

B peut être écrit : $B = 30^{+0,075}_{+0,025}$.

Remarque. — On aurait pu trouver plus rapidement B_{max}, puisque $B_{min} = 30,025$ et $ITB = 0,05$

$$B_{max} = B_{min} + ITB = 30,025 + 0,05 = 30,075.$$

2° Conclusions.

L'usinage direct des cotes tolérancées qui deviennent cotes outil ou cotes machine est la solution qui conserve les intervalles de tolérance prévus pour le réglage ou la fabrication des outils.

Transformer une cote fonctionnelle tolérancée en cote résultante conduit généralement à la diminution des tolérances des autres cotes fonctionnelles et rend de ce fait l'usinage plus délicat : cette pratique est en principe à éviter.

INSTALLATION D'UNE CONDITION DE FONCTIONNEMENT

On veut installer un jeu de fonctionnement J sur un ensemble fabriqué en série qui est représenté sur la *figure* 13, sur laquelle la chaîne de cotes a été dessinée.

A intéresse le manchon ②, B l'arbre ①, D la goupille cylindrique ④, C la bague ③.

La cote du jeu J est la résultante des autres cotes. L'axe orienté est XX'.

Relation des valeurs nominales :

$$J = B - A - C - D$$
$$B = J + A + C + D = 62{,}2.$$

Relation des IT :

$$ITJ = ITA + ITB + ITC + ITD$$
$$0{,}4 = 0{,}1 + ITB + ITC + 0{,}05$$

d'où : $ITB + ITC = 0{,}25$.

La cote B étant la cote de position d'un trou, doit être assortie d'un intervalle de tolérance aussi large que possible. La bague ④ pouvant être rectifiée, ITC sera pris égal à 0,05 :

$$ITB = 0{,}25 - ITC = 0{,}25 - 0{,}05 = 0{,}2.$$

Calcul de la cote C supposée définie : $C^{\pm x}$

$$ITC = 2x = 0{,}05 ; \quad x = 0{,}025 ; \quad \mathbf{C = 12^{\pm 0{,}025}}$$

Relation des cotes maxi et mini, en tenant compte du sens des vecteurs cotes :

$$J_{min} = B_{min} - A_{max} - C_{max} - D_{max}$$
$$0{,}2 = B_{min} - 40{,}05 - 12{,}025 - 10{,}025$$
$$B_{min} = 62{,}3$$
$$B_{max} = B_{min} + ITB = 62{,}3 + 0{,}2 = 62{,}5$$
$$\mathbf{B = 62{,}3^{+0{,}2}_{+0}}.$$

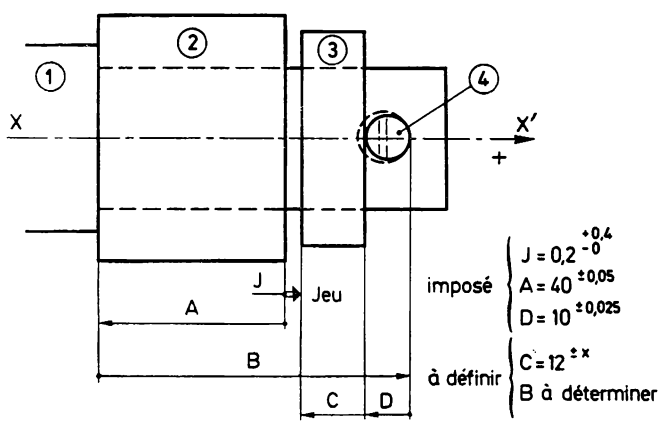


Fig. 13.

D. — Tolérances de forme

1° Définition des surfaces et lignes enveloppes.

Il existe une définition géométrique des surfaces et lignes ; *exemple :* surface plane, cylindrique ; ligne droite, circulaire, etc.

En réalité, il n'est pas possible de réaliser des surfaces ou lignes matérielles répondant exactement à la définition géométrique. On se trouve dans l'obligation de considérer l'existence de surfaces ou de lignes théoriques dites « enveloppes » des surfaces matérielles qui, elles, possèdent des imperfections.

L'enveloppe d'une surface matérielle est la surface théorique en contact avec la surface réelle par le nombre maximum de points, mais qui ne la coupe pas.

La définition de la ligne enveloppe est identique.

2° Tolérance de forme.

La tolérance de forme définit la plus grande valeur admissible de l'erreur de forme existant entre la surface (ou ligne) enveloppe et la surface (ou ligne) réelle (*fig.* 14).

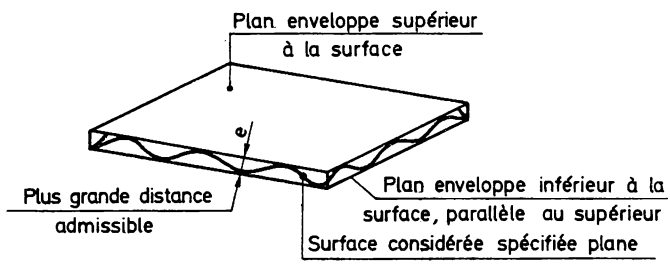


Fig. 14.

a) Tolérances de forme des surfaces.

On distingue les tolérances de planéité, de cylindricité, de forme des surfaces quelconques.

Planéité.

Elle est définie par la plus grande distance admissible entre tout point de la surface considérée spécifiée plane et sa surface enveloppe (*voir fig.* 14).

Dans les ateliers et laboratoires industriels de métrologie, le marbre est considéré comme possédant une surface plane avec une approximation suffisante.

Symbole utilisé : ▱ (*fig.* 15).

Indication sur les dessins : On utilise la représentation de la *figure* 16 lorsque l'erreur admissible $e = 0{,}05$ intéresse toute la surface de la pièce et la représentation de la *figure* 17 lorsque l'erreur $e = 0{,}05$ intéresse toute portion de la surface inscrite dans un carré de 100 mm de côté.

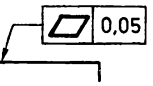


Fig. 16.

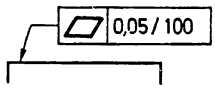


Fig. 17.

Cylindricité.

Elle est définie par la plus grande distance radiale e admissible entre tout point de la portion de surface considérée comme cylindrique et le cylindre enveloppe dont l'axe XX′ est celui du cylindre théorique (*fig.* 18). La surface spécifiée cylindrique doit être située entre deux cylindres théoriques, l'un qui est enveloppe extérieure et l'autre pouvant être considéré comme enveloppe intérieure.

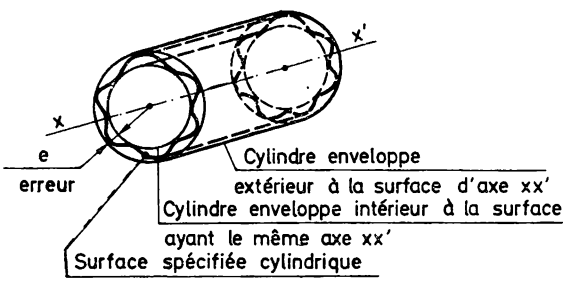


Fig. 18.

Symbole utilisé : ⌭ (*fig.* 19).

Indication sur les dessins (*voir fig.* 20) : Elle signifie que l'axe du tourillon doit être compris entre deux cylindres coaxiaux (axe XX′) dont la différence des rayons est $e = 0{,}05$. Les diamètres de ces cylindres et leur position doivent satisfaire la condition imposée par la tolérance de dimension.

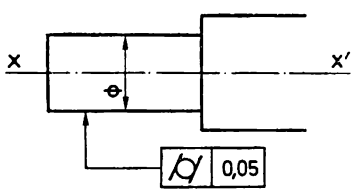


Fig. 20.

Le contrôle de la cylindricité doit se faire à partir de l'axe XX′ que l'on aura matérialisé.

Tolérance de forme d'une surface quelconque (par exemple surface latérale d'une came, surface hélicoïdale réglée ou curviligne).

Pour toutes les surfaces géométriques, il est possible de définir la surface enveloppe.

La tolérance de forme est la plus grande distance admissible entre tout point de la surface considérée et la surface enveloppe.

Symbole utilisé : ⌓ (*fig.* 21).

Indication sur les dessins : *Voir figure* 22, qui montre ce que représente $e_{max} = 0{,}05$.

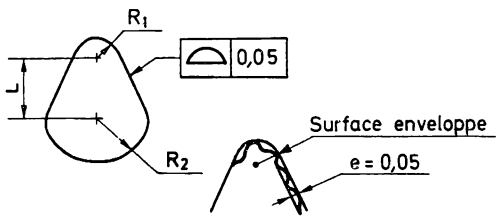


Fig. 22.

b) Tolérances de forme des lignes.

Rectitude.

La tolérance de rectitude est le plus grand diamètre admissible du cylindre enveloppe de la portion de ligne considérée spécifiée droite (*fig.* 23).

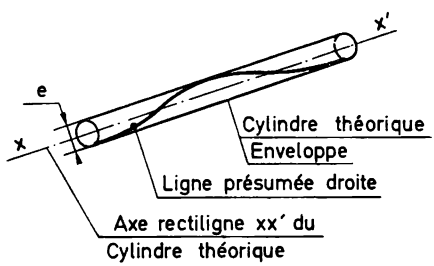
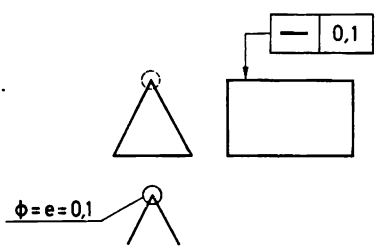


Fig. 23.

Symbole utilisé : —— (*fig.* 24).

Indication sur les dessins : *Voir figure* 25 : intersection de deux surfaces planes ; *figure* 26 (1) et (2) : rectitude de l'axe d'un cylindre. La représentation de la *figure* 26 (1) est recommandée parce que plus claire.

Fig. 25.



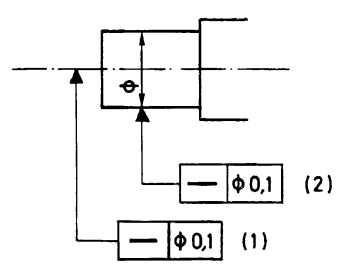


Fig. 26.

La ligne spécifiée rectiligne peut être située dans un plan. Dans ce cas, la tolérance est comprise entre deux droites théoriques. C'est le cas de la définition de la tolérance de rectitude des génératrices d'un cylindre ou d'un cône intersection de ces surfaces par un plan théorique passant par leur axe (*voir fig.* 27).

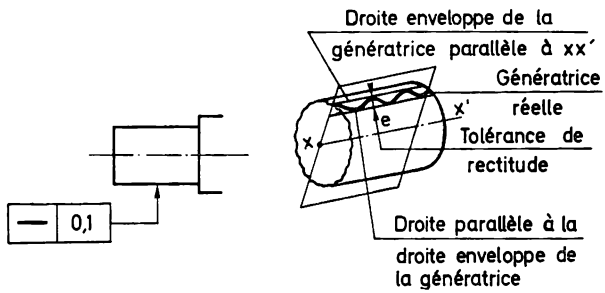


Fig. 27.

Circularité.

Elle est définie par la plus grande distance admissible, dans le plan d'une section normale à l'axe, entre la ligne d'intersection de la surface considérée spécifiée cylindrique et son cercle enveloppe (*fig.* 28).

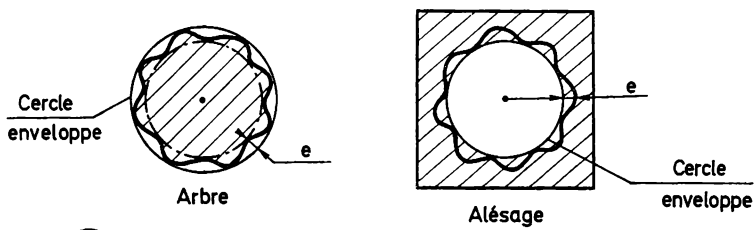


Fig. 28.

Symbole utilisé : ◯ (*fig.* 29).

Indication sur les dessins : Sur la *figure* 30, nous trouvons l'indication, sur un même cylindre, d'une tolérance de circularité de 0,05 et de cylindricité de 0,1. Cela signifie que la surface cylindrique doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont la différence des rayons est de 0,1 et que chacune des sections droites du cylindre doit avoir une forme disposée dans une couronne de largeur 0,05.

Tolérance de forme d'une ligne quelconque.

La définition de la tolérance est semblable à celle de la rectitude ou de la circularité.

Symbole utilisé : ⌒ (*fig.* 31).

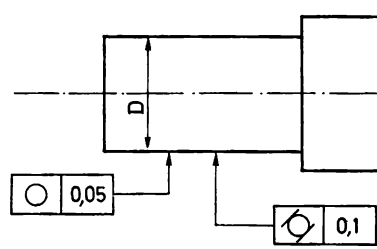


Fig. 30.

E. — Tolérances de position des surfaces et lignes

1° Parallélisme.

Symbole : // (*fig.* 32).

Parallélisme de deux surfaces planes.

Désignation : *figures* 33 et 34.

Le parallélisme se définit, pour une surface spécifiée plane, par rapport à la surface enveloppe de la surface de référence plane [A].

La surface spécifiée plane parallèle à la surface de référence doit être comprise entre deux plans théoriques dont la distance est égale à la tolérance de parallélisme (*fig.* 35).

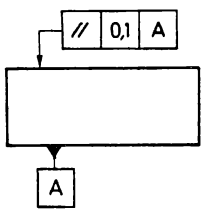


Fig. 33.

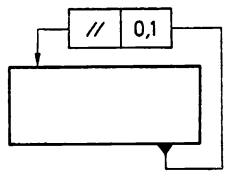


Fig. 34.

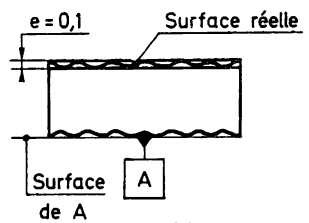


Fig. 35.

Parallélisme d'une surface de symétrie de deux plans par rapport à une surface de référence [A] *supposée plane.*

Désignation : *figure* 36, première et deuxième notations.

La *figure* 37 définit la tolérance de parallélisme comprise entre deux plans parallèles distants de $e = 0{,}1$, à égale distance du plan théorique de symétrie.

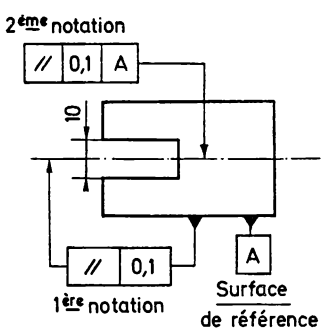


Fig. 36.

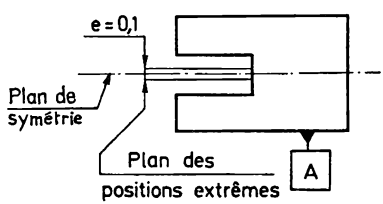


Fig. 37.

Parallélisme de l'axe d'un alésage d'un cylindre par rapport à une surface de référence [A] ***supposée plane*** (*fig.* 38).

L'axe de l'alésage doit être compris entre deux plans parallèles à A, distants de 0,05, ayant pour plan de symétrie le plan passant par l'axe théorique moyen.

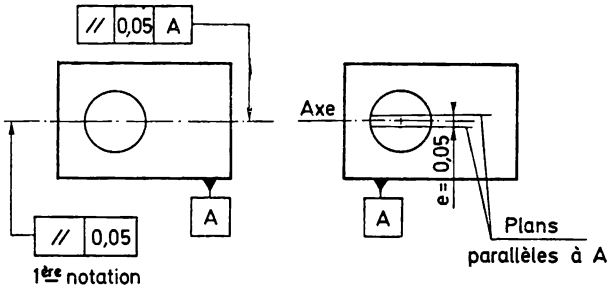
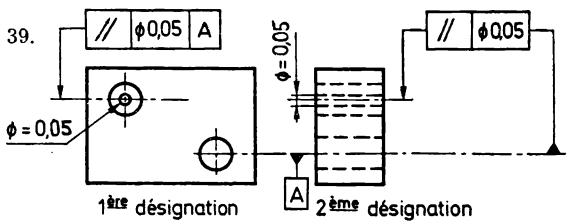


Fig. 38.

Parallélisme de deux alésages (*fig.* 39).

L'axe de l'alésage inférieur est l'axe de référence [A]. L'axe de l'alésage supérieur doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,05, parallèle à l'axe de l'alésage A.

Fig. 39.



2° Perpendicularité.

Symbole : ⊥ (*fig.* 40).

Perpendicularité de deux surfaces planes (*fig.* 41).

L'une des surfaces est prise comme référence [A] (on lui substitue son plan théorique enveloppe). L'autre surface doit être située entre deux plans théoriques distants de 0,1 et perpendiculaires à la face [A].

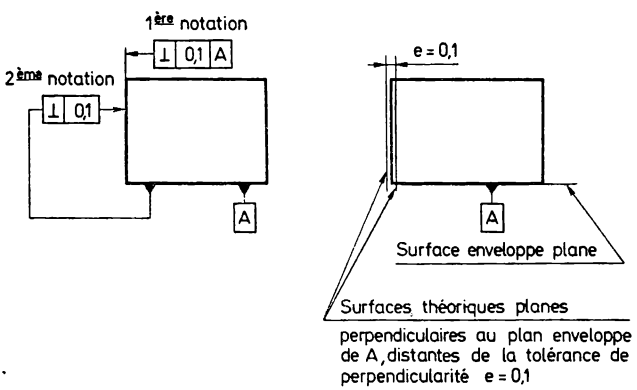


Fig. 41.

Perpendicularité de l'axe d'un alésage à une face *(fig. 42).*

La face d'extrémité de la pièce alésée doit être située entre deux plans parallèles distants de 0,2 et perpendiculaires à l'axe de l'alésage.

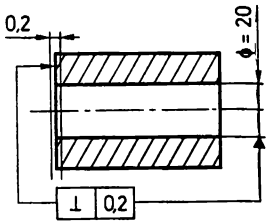


Fig. 42.

3° Inclinaison.

Symbole : ∠ *(fig. 43).*

Inclinaison d'une surface plane par rapport à une surface plane [A] ***prise comme référence.***

La face inclinée doit être comprise entre deux plans théoriques parallèles distants de 0,1 et inclinés de 60° sur la face [A] *(fig. 44).*

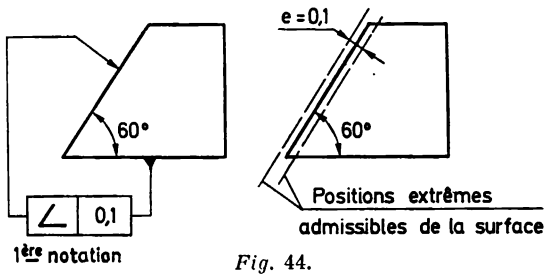


Fig. 44.

4° Symétrie.

Symbole : ⌯ *(fig. 45).*

La symétrie de deux surfaces se définit par rapport à un plan [A].

Symétrie d'une rainure de clavette par rapport au plan axial d'un arbre [A].

Désignation : *figure* 46.

Le plan de symétrie de la rainure XX′ est compris entre deux plans parallèles au plan axial de l'arbre et distants de $e = 0{,}1$.

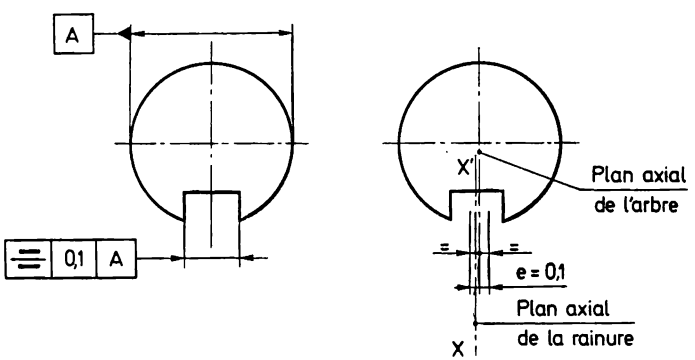


Fig. 46.

5° Coaxialité de deux surfaces.

Symbole : ◎ (*fig.* 47).

Désignation : *figure* 48.

La surface cylindrique de petit diamètre est prise comme référence [A].

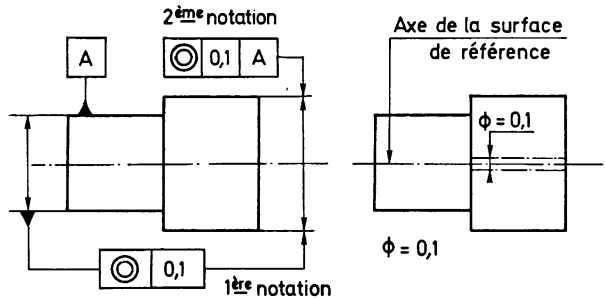


Fig. 48.

L'axe du cylindre de gros diamètre doit être disposé dans une surface cylindrique théorique de diamètre 0,1 et ayant pour axe celui du petit cylindre de la pièce.

Remarque. — A l'intérieur de la zone des tolérances dimensionnelles, doivent être situées les tolérances de forme et de position (*fig.* 49).

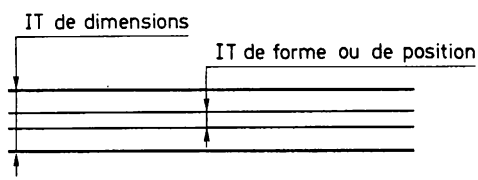


Fig. 49.

Quand les tolérances de forme et de position ne sont pas indiquées, elles doivent être considérées comme égales aux tolérances de dimensionnement.

F. — L'État des surfaces

La connaissance de l'état de surface des objets est indispensable car il permet d'apprécier leurs conditions à l'emploi. Mais une mesure des caractéristiques de la surface extérieure est indispensable pour comparer les résultats obtenus par les opérations d'usinage.

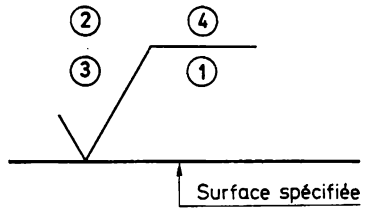


Fig. 50.

De même, il est intéressant de connaître quels ont été les procédés d'élaboration. Le symbole utilisé prévoit l'inscription sur un signe ressemblant à un radica (*fig.* 50). Quatre critères :

(1) Symbole de la fonction.

(2) Symbole normalisé des critères de profil, exprimé en microns par les nombres de la série Renard.

(3) Symbole et deuxième critère de profil.

(4) Symbole du procédé.

Notons que des *notas* pourront éventuellement être ajoutés.

Signification des critères.

(1) FG : frottement de glissement ; FR : frottement de roulement ; ED : étanchéité dynamique ; ES : étanchéité statique ; AD : adhérence ; OC : outil coupant (arête).

(2) 100, 50, 25, 12,5, 8,3, 3,2, 1,6, 0,8, 0,4, 0,2, 0,1, 0,05, 0,025.

(3) Autre critère souvent peu employé.

(4) dr : dressage ; gr : grattage ; me : meulage ; ef : électro-formage ; ep : électro-polissage ; ga : galetage ; es : estampage ; et : étirage ; tr : tournage ; éé : électro-érosion, etc.

Exemple (*fig.* 51).

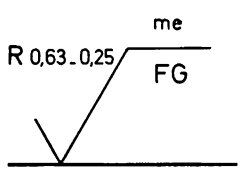


Fig. 51.

Incertitudes et erreurs
des mesures dimensionnelles

A. — Généralités

1° Erreur de mesure.

Un opérateur mesure la dimension d'une pièce avec un appareil, à lecture directe, par exemple. Il lit une valeur qu'il attribue à la pièce : 40,050.

Il dira : *la dimension de la pièce est* 40,050.

Si la pièce a une dimension réelle de 40,020 dans les conditions de température de l'expérimentation (15°, par exemple), on dira : *à* 15°, *l'erreur commise par l'opérateur est de* :

$$40{,}050 - 40{,}020 = 0{,}030 \text{ par excès.}$$

L'erreur de mesure est la différence entre la cote attribuée à la pièce à la suite de la mesure et la cote réelle de la pièce.

2° Incertitude résultant de la mesure.

Le même opérateur mesure la même pièce plusieurs fois. Il lit des valeurs différentes, qui s'échelonnent de 40,030 à 40,070.

Il hésite donc à attribuer à la pièce la cote 40,030 — 40,040 — 40,050 — 40,060 ou 40,070.

On dit que, pour cet opérateur et avec cet appareil de mesure, l'incertitude de la mesure est 40,070 — 40,030 = 0,040.

L'incertitude de la mesure est la différence entre la plus grande et la plus petite des valeurs relevées au cours d'une série de mesures.

3° Erreur maximum et erreur minimum.

Dans le cas précédent, **l'erreur**, commise dans les conditions de température de l'expérimentation, **a une valeur maximum si l'on affecte à la cote la plus grande valeur lue** :

$$\text{erreur maximum} = 40{,}070 - 40{,}020 = 0{,}050.$$

L'erreur a une valeur minimum si l'on affecte à la cote la plus petite valeur lue :

erreur minimum = 40,030 — 40,020 = 0,010.

(Voir *fig.* 1, partie A).

Il y a donc toujours une erreur parce que la cote exacte de la pièce ne se trouve pas située entre les cotes extrêmes lues, c'est-à-dire dans la zone d'incertitude.

Imaginons le cas contraire : la cote exacte est 40,020 ; l'intervalle d'incertitude a pour limites : 40,010 et 40,050.

L'erreur maximum a pour valeur :

40,050 — 40,020 = 0,030 par excès.

L'erreur minimum est ici nulle (voir *fig.* 1, partie C).

On remarquera que, pour la même incertitude de mesure

(40,050 — 40,010 = 0,040),

les erreurs sont les plus faibles quand la cote exacte est comprise dans la zone d'incertitude des mesures (comparaison de la partie C avec les parties A et B de la *figure* 1).

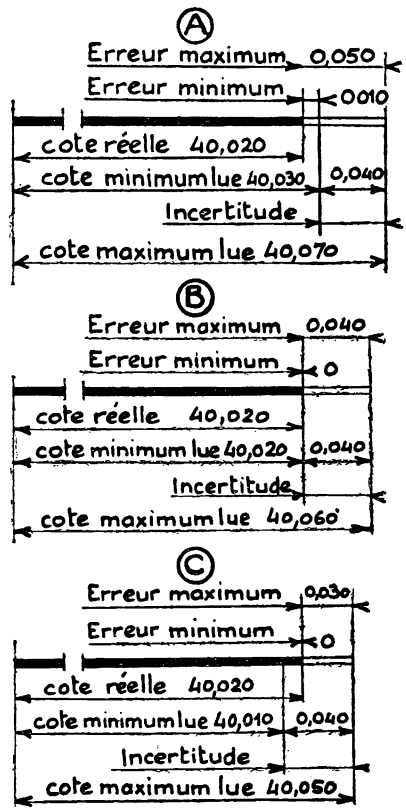


Fig. 1. — Comparaison des erreurs de mesure en fonction de la position de la cote exacte par rapport aux limites d'incertitude.

Conclusions.

Pour limiter au maximum la valeur des erreurs possibles, il faut :

1° Ramener les limites extrêmes de l'incertitude de part et d'autre de la cote exacte.

2° Rendre minimum l'incertitude, c'est-à-dire l'écart existant entre les cotes maximum et minimum lues.

B. — Qualités d'un appareil de mesure

Nous avons vu, en physique, qu'un appareil de mesure doit être à la fois *juste, sensible et fidèle.*

L'étude critique de ces qualités va nous conduire à d'utiles conclusions.

1° Justesse.

La justesse d'un appareil est caractérisée par l'exactitude de sa valeur indiquée s'il s'agit d'un appareil à dimension fixe, ou de sa graduation s'il s'agit d'un appareil à lecture directe.

L'exactitude des dimensions ou de la graduation d'un appareil dépend :

— de la précision de sa fabrication ;

— de l'usure des parties en mouvement (vis micrométriques, par exemple) ou des faces en contact avec la pièce ;

— des déformations résultant d'une stabilisation incomplète du métal, au moment des dernières opérations de sa fabrication ;

— des déformations ayant pour origine des chocs ou des efforts exagérés, appliqués avant ou pendant la mesure.

Les défauts de justesse influent surtout sur la position des limites d'incertitude par rapport à la cote exacte.

Mais on peut connaître la valeur de ces défauts en étalonnant les appareils avant de les employer ; il est alors possible d'en corriger les indications.

Prenons un exemple : on se propose de mesurer, au palmer, une cote $50\,h\,7$, soit 50^{+30}_{0} ; pour étalonner l'appareil, on utilise une cale étalon dont la dimension est égale à la cote nominale de la pièce : 50. Supposons que la cote lue, quand on mesure la cale, soit : 49,98. Cela signifie que l'erreur absolue, au voisinage de 50, est : 0,02 par défaut. L'erreur relative est : $\frac{0,02}{50} = 0,0004$. Si on lit 49,99 quand on mesure la dimension de la pièce, la cote exacte peut être prise égale à $49,99 + 0,02 = 50,01$.

Nous avons pu admettre la même erreur absolue sur la pièce et sur l'étalon parce que nous avons choisi un étalon de cote très voisine de la cote de la pièce.

Si nous avions choisi un étalon de 30 mm, nous n'aurions eu aucune raison d'admettre une relation mathématique entre les erreurs trouvées pour cet étalon et pour la pièce, car les causes d'erreur — nous l'avons vu — sont trop diverses.

Dans la pratique, il n'est pas possible, pour toutes les mesures, d'étalonner l'appareil de mesure. On procède donc à un étalonnage périodique, et l'on trace une courbe d'étalonnage pour toutes les graduations de l'échelle, lorsqu'il s'agit d'appareils de mesure à lecture directe.

2° Sensibilité.

La sensibilité d'un appareil est le rapport de la longueur du déplacement constaté sur la graduation de l'appareil, à l'écart de dimension constaté sur la pièce mesurée.

Supposons un comparateur à cadran dont les divisions sont distantes de 2 mm ; puisque chaque division correspond à une différence de dimension de la pièce de 0,01, le coefficient de sensibilité du comparateur est: $\frac{2}{0{,}01} = 200$.

Le *coefficient de sensibilité,* ou encore *d'amplification* d'un amplificateur à aiguille (dont 1 division, distante de 1 mm, correspond à un déplacement de la touche de 0,001) est : $\frac{1}{0{,}001} = 1\,000$.

S'il est possible d'apprécier la position d'une aiguille à un demi-millimètre près, ce qui correspond à 1/4 de division pour le comparateur à cadran, on peut, garantir la cote à $\frac{0{,}01}{4} = 0{,}0025$ près, soit à 2,5 μ près.

Dans le cas de l'amplificateur à aiguille, on apprécierait $\frac{1}{2}$ division ; la cote pourrait être garantie à $\frac{0{,}001}{2} = 0{,}0005$ mm près, soit à 0,5 μ près.

Nous remarquerons que le rapport des erreurs possibles :

$$\frac{\textit{erreur comparateur}}{\textit{erreur amplificateur}} = \frac{2{,}5}{0{,}5} = 5,$$

est égal au rapport des inverses des coefficients de sensibilité :

$$\frac{\textit{inverse sensibilité comparateur}}{\textit{inverse sensibilité amplificateur}} = \frac{\frac{1}{200}}{\frac{1}{1\,000}} = 5.$$

On a donc toujours intérêt, pour avoir une incertitude de lecture minimum, à choisir un appareil dont le coefficient de sensibilité ou d'amplification soit maximum.

Il est intéressant de remarquer que, pour une sensibilité déterminée, l'incertitude de la lecture diminue si l'on est à même d'apprécier une fraction de division plus petite. Ainsi, avec le comparateur à cadran précédent, si l'on peut apprécier 0,1 mm, ce qui correspond à $\frac{1}{20}$ de division, l'incertitude de lecture devient égale à $\frac{0{,}01}{20} = 0{,}0005$, soit à 0,5 μ.

Or, nous avions trouvé précédemment 2,5 μ lorsque l'appréciation visuelle était supposée égale à 5/10 de mm. Cette diminution de l'incertitude avec l'écart d'appréciation explique que l'on ait cherché à substituer, à l'observation visuelle des divisions, la lecture des graduations avec des *dispositifs optiques grossissants* dont nous étudierons plus loin le principe (page 404) : *loupe,* grossissement 2 à 8 ; *microscopes,* grossissements 20 à 100.

3° Fidélité.

Un appareil de mesure est fidèle quand il indique toujours la même dimension, pour toutes les mesures successives effectuées sur la même pièce et dans les mêmes conditions expérimentales.

L'incertitude, écart existant entre la mesure la plus élevée et la mesure la plus faible, caractérise la fidélité de l'appareil employé.

Les défauts de fidélité dépendent de l'opérateur, de l'appareil et des températures de mesure.

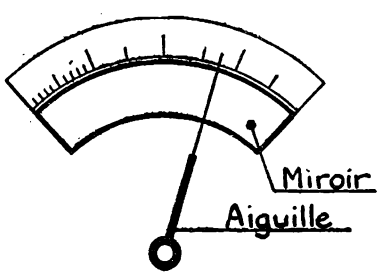
a) *Défauts imputables à l'opérateur.*

Erreurs de lecture et d'utilisation.

— L'opérateur ne peut lire des divisions trop rapprochées sans se tromper : il semble que l'écartement entre deux traits ne saurait être inférieur à 0,2 pour une lecture répétée à l'œil nu, bien que le pouvoir séparateur de l'œil permette de distinguer, à 20 cm, deux points ou traits distants de 0,1.
L'emploi d'appareils optiques grossissants a limité considérablement le risque d'erreurs de lecture et a permis d'apprécier, avec plus de certitude, la fraction de division indiquée.

La difficulté de lecture vient souvent des niveaux différents occupés par les traits qui doivent être en concordance. Pour pallier cet inconvénient, on a, par exemple, gravé le vernier des pieds à coulisse sur une surface plane faisant un angle très faible avec la réglette et on a prévu, sur les palmers, un cône de très faible conicité pour recevoir la graduation circulaire. Notons, enfin, que l'on cherche à substituer, à la mise en concordance des traits de deux graduations, la lecture directe chiffrée : tel est le cas de la lecture d'une dimension sur un cadran gradué devant lequel se déplace une aiguille ; le maximum de précision est obtenu pour une position de l'observateur telle que l'aiguille cache sa propre image sur un miroir enchâssé dans le cadran (*fig.* 2).

— Les erreurs de mesure peuvent aussi provenir d'une mauvaise présentation de la pièce ou de l'appareil de mesure. Des déformations élastiques peuvent naître notamment au contact appareil-pièce. L'effort d'application de l'un sur l'autre doit être aussi faible que possible et toujours le même si l'on veut avoir des mesures comparables. Les valeurs adoptées sont de 0,5 à 2 N (50 à 200 gf). On cherche à éviter que les poids de l'appareil et de la main de l'opérateur ne viennent augmenter la pression de contact et amplifier ainsi la déformation de la pièce ou de l'appareil de mesure.



← *Fig.* 2. — Lecture sur un cadran gradué comportant un miroir qui reflète l'image de l'aiguille.

Chaque fois que c'est possible, les surfaces de contact doivent être placées dans un plan vertical (*fig.* 3). L'étude des écrasements des contacts montre qu'il faut rechercher pour eux le maximum de longueur et de largeur. On trouvera, traitée dans un chapitre suivant, l'étude des déformations des contacts.

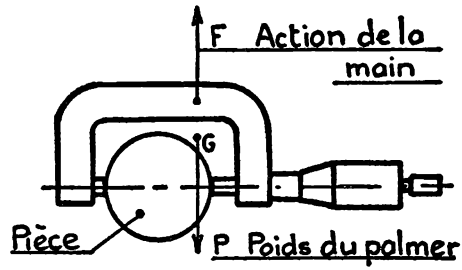


Fig. 3. — Bonne position du palmer pendant une mesure. ——→

b) *Défauts imputables à l'appareil.*

Le peu d'importance des défauts imputables à l'appareil dépend du soin apporté à sa fabrication, de la qualité des matériaux employés et de la dureté des parties frottantes.

Ainsi, la non-rectitude de la règle d'un calibre à coulisse, les jeux observés dans les articulations ou dans la liaison d'une vis micrométrique avec son écrou constituent des sources d'erreurs qui peuvent s'ajouter ou se retrancher au gré des mesures, surtout quand un même appareil comporte plusieurs défauts.

Pour les appareils à grande amplification, les jeux aux articulations situées près de la touche mobile risquent d'entraîner des erreurs qui, par le jeu de l'amplification, peuvent être très importantes.

c) *Défauts imputables aux effets thermiques.*

Un appareil est étalonné à une température déterminée. La mesure d'une longueur n'est correcte que si la pièce et l'appareil sont tous deux à la température d'étalonnage.

La température d'étalonnage choisie est de 20°. Les cotes portées sur les plans sont des cotes prévues pour cette température.

Lorsqu'on fait des mesures de haute précision, on prend de très grandes précautions pour assurer l'équilibre de température de toutes les parties de la pièce à mesurer avec celle de l'appareil de mesure.
A l'heure actuelle, la métrologie de haute précision est limitée à 0,1 μ par mètre, parce que l'on ne peut mesurer avec certitude qu'une température égale à 0,01 degré.

L'influence de la température sur la précision des mesures nous a semblé justifier un chapitre particulier de cet ouvrage.

C. — Étude de l'écrasement des contacts résultant des déformations des pièces

Les actions de contact résultant du poids des pièces, des efforts dus aux mécanismes, produisent des déformations de compression.

Il est intéressant d'en préciser l'importance, afin de ne pas commettre des erreurs d'appréciation regrettables. Nous ne nous contenterons pas de donner des formules de déformation : nous les appliquerons à des cas particuliers.

a) *Déformation d'un prisme ou d'un cylindre en contact par sa base sur un plan.*

— Calculons, par exemple, l'écrasement d'une cale étalon, disposée verticalement, sous l'action de son propre poids (*fig.* 4).

Si H est la *hauteur de la cale* en mm,

δ, le *poids spécifique* en N/mm³,

E, le *module d'élasticité du métal* en N/mm²,

le *raccourcissement* e (en mm) est donné par la relation

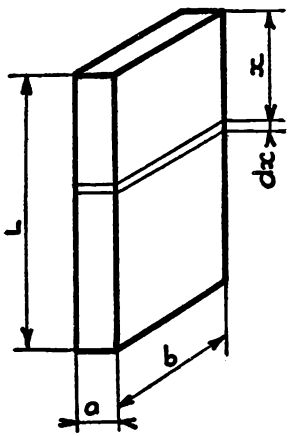


Fig. 4. — Éléments entrant dans le calcul des déformations d'une cale étalon sous l'action de son propre poids.

$$e = \frac{H^2\delta}{2E}.$$

On peut aisément établir cette formule :

On considère un élément de cale, de longueur dx, qui supporte le poids de la cale disposée au-dessus. Le raccourcissement de cette partie est donné par la *loi de Hooke* :

$$a = i \times l = \frac{R}{E} \times l.$$

Puisque $$R = \frac{S \times x \times \delta}{S} = x\delta$$

et $l = dx$, cette relation donne ici :

$$a = \frac{x\delta}{E} dx.$$

Le raccourcissement total est égal à :

$$\Sigma a = \frac{\delta}{E} \Sigma x\, dx = \frac{\delta}{E} \times \frac{x^2}{2}.$$

Quand $x = H$, $$\Sigma a = e = \frac{H^2\delta}{2E}.$$

Supposons une cale de 70 mm ($H = 70$; $a = 10$; $b = 30$).

E, module d'élasticité en N/mm² = 220 000 N/mm² ;

δ, poids spécifique en N/mm³ = 78×10^{-6} N/mm³.

On a :

$$e = \frac{70^2 \times 78}{10^6 \times 2 \times 2{,}2 \times 10^5} = \frac{4{,}9 \times 7{,}8}{4{,}4 \times 10^8} = 8{,}7 \times 10^{-8} \text{ mm}$$

$\simeq 10^{-4}$ μ, valeur absolument insignifiante.

— Supposons que, sur cette cale (*fig.* 5), on exerce un effort P = 10 N (= 1kgf).

Si nous négligeons le raccourcissement dû au poids propre de la cale et ne considérons que la charge P appliquée, le raccourcissement a pour valeur :

$$e_1 = \frac{P \cdot H}{S \cdot E}$$

e_1 en mm ; H = 70 mm ; S = 30 × 10 = 300 mm² ; E = 220 000 N/mm² et P = 10 N.

$$e_1 = \frac{10 \times 70}{300 \times 220\,000} = \frac{7 \times 10^{-5}}{3 \times 2{,}2}$$

$$= 1{,}05 \times 10^{-5} \text{ mm} \simeq 0{,}01 \ \mu, \text{ valeur également négligeable.}$$

b) ***Écrasement d'un contact linéaire : plan sur cylindre.***

Lorsque le contact de la touche se fait sur un cylindre (*fig.* 6), on peut calculer l'écrasement local par la formule empirique suivante, qui intéresse les pièces en acier :

$$e_2 = 10^{-4} \times \frac{P}{L} \sqrt[3]{\frac{1}{\Phi}}$$

e_2 en mm ; P en newtons ; Φ, diamètre de la pièce en mm ; L, longueur de contact en mm.

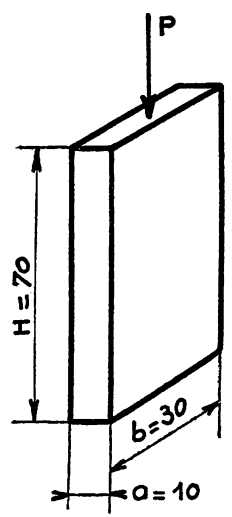


Fig. 5. — Cale étalon soumise à un effort P.

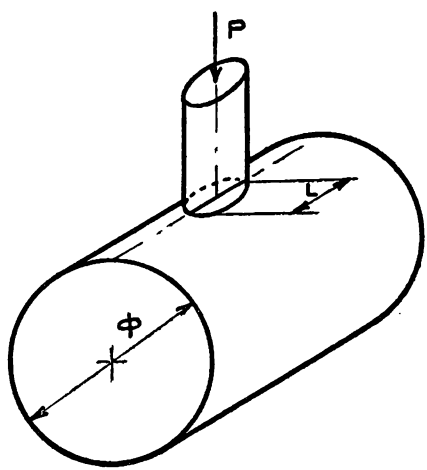


Fig. 6. — Contact linéaire.

— Supposons une tige de comparateur, à bout plat, appuyée sur une pièce cylindrique :

$$L = 4; \qquad \Phi = 20 \qquad \text{et} \qquad P = 1 \text{ N (0,1 kgf).}$$

On a :

$$e_2 = 10^{-4} \times \frac{1}{4} \times \sqrt[3]{\frac{1}{20}} = \frac{10^{-4}}{4 \times 2{,}7} \simeq 10^{-5} \text{ mm} = 0{,}01\ \mu.$$

Cette valeur n'intéresse que le contact touche-pièce ; mais, pour déterminer l'erreur de mesure, il faut tenir compte aussi du raccourcissement de la tige du comparateur, elle-même chargée en bout de l'effort P.

Ce raccourcissement est donné par la relation,

$$e = \frac{H \cdot P}{S \cdot E}$$

H, longueur de la tige en mm ; S, section de la tige en mm ; E, module d'élasticité en N/mm² et P, effort en newtons.

En prenant : H = 70 (longueur de la tige d'un comparateur),

$$S = \pi \times 2^2 \simeq 12{,}5 \text{ mm}^2 \text{ et } P = 1 \text{ N,}$$

on aurait ici :

$$e = \frac{70 \times 1}{12{,}5 \times 2{,}2 \times 10^5} = 2{,}5 \times 10^{-5} \text{mm} = 0{,}025\ \mu.$$

L'erreur totale est donc de 0,01 + 0,025 = 0,035 μ.

c) *Écrasement d'un contact ponctuel : sphère sur plan.*

On utilise, pour calculer l'écrasement des contacts en acier (*fig.* 7), la formule empirique :

$$e_3 = 3 \times 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{P^2}{r}}$$

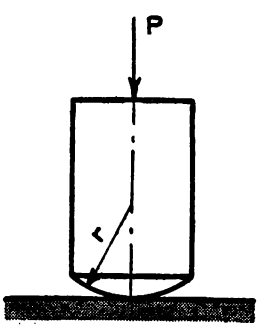


Fig. 7. — Contact ponctuel.

P représente l'effort axial en newtons ; *r*, le rayon de la sphère en mm ; e_3, l'écrasement en mm.

— Si l'on se place dans le même cas que précédemment, on a : P = 1 N.

En donnant *r* = 8 mm, il vient :

$$e_3 = 3 \times 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{1^2}{8}} = 1{,}5 \times 10^{-4} \text{ mm} = 0{,}15\ \mu,$$

valeur qui est 15 fois supérieure à celle qui a été obtenue précédemment.

D. — Influence de la température sur la précision des mesures dimensionnelles

1° Rappel des notions de physique indispensables à la compréhension de cette étude.

Les dimensions d'un corps solide augmentent lorsque la température augmente : *le corps se dilate.*

Elles diminuent quand la température diminue : *le corps se contracte.*

Désignons par :

L_t la longueur d'une pièce à la température t,
$L_{t'}$ la longueur de cette pièce à la température t',
L_0 la longueur de cette pièce à 0°,
λ le coefficient de dilatation linéaire dont la valeur, pour les différents métaux, est :

métal invar : $\lambda = 0{,}0000015 = 0{,}15 \times 10^{-5}$
acier : $\lambda = 0{,}000012 = 1{,}2 \times 10^{-5}$
laitons : $\lambda = 0{,}000018 = 1{,}8 \times 10^{-5}$
alliages d'aluminium : $\lambda = 0{,}000023 = 2{,}3 \times 10^{-5}$
alliages de magnésium : $\lambda = 0{,}000025 = 2{,}5 \times 10^{-5}$.

a) *Calcul de la longueur d'une pièce en fonction de la température.*

L'étude de la dilatation linéaire des corps conduit aux relations suivantes :

$$L_t = L_0(1 + \lambda t) \quad (1)$$

$$L_{t'} = L_0(1 + \lambda t'). \quad (2)$$

APPLICATION NUMÉRIQUE :

Une pièce en acier a une longueur $L_0 = 20$ mm à 0°. Calculer sa longueur L_{20} à 20°.

Appliquons la relation (1)

$$L_{20} = 20\ (1 + 0{,}000012 \times 20)$$
$$= 20 \times 1{,}00024 = 20{,}0048.$$

Si t n'est pas très grand, le binôme de dilatation $1 + \lambda t$ est voisin de 1, soit : $(1 + \lambda t) = 1{,}00024$ dans l'exemple choisi.

b) *On connaît la longueur $L_{t'}$ d'une pièce à la température t' et on se propose de calculer la longueur L_t à la température t.*

Divisons membre à membre la relation (2) par la relation (1), il vient

$$\frac{L_t}{L_{t'}} = \frac{1 + \lambda t}{1 + \lambda t'} \quad \text{qui peut s'écrire :} \quad L_t = L_{t'}\frac{1 + \lambda t}{1 + \lambda t'}. \quad (3)$$

c) *Dilatation ou contraction des pièces.*

On connaît la longueur $L_{t'}$ d'une pièce, à la température t'. A la température $t > t'$ la pièce, qui a une longueur L_t, s'est dilatée d'une longueur $\Delta_l = L_t - L_{t'}$

On a, en utilisant la relation (3) :

$$\Delta_l = L_t - L_{t'} = L_t \frac{1 + \lambda t}{1 + \lambda t'} - L_{t'}$$

d'où, en mettant $L_{t'}$ en facteur commun :

$$\Delta_l = L_{t'}\left(\frac{1 + \lambda t}{1 + \lambda t'} - 1\right) = L_{t'} \frac{(1 + \lambda t) - (1 + \lambda t')}{1 + \lambda t'}$$

$$\Delta_l = \frac{L_{t'} \cdot \lambda(t - t')}{1 + \lambda t'}.$$

Or, nous avons vu que $1 + \lambda t'$ est voisin de 1, si t' n'est pas très grand. On peut donc, sans augmenter notablement l'incertitude, remplacer le terme $1 + \lambda t'$ par 1.

Il vient :

$$\Delta_l = L_t - L_{t'} \simeq L_{t'} \cdot \lambda(t - t'). \qquad (4)$$

La longueur $L_{t'}$ étant connue, si t devient plus petit que t', $L_{t'}$ est plus petit que $L_{t'}$. La contraction de la pièce est égale à $L_{t'} - L_t$.

Mais si l'on convient de considérer une contraction comme une dilatation négative, on peut l'exprimer par la même relation que celle qui a permis de calculer les dilatations :

$$\Delta_l = L_t - L_{t'} = L_{t'} \cdot \lambda(t - t'). \qquad (4)$$

On utilisera donc la même relation pour calculer une dilatation ou une contraction.

Le résultat est *positif*, on a une *dilatation.*

Le résultat est *négatif*, on a une *contraction.*

Si on reprend la relation :

$$\Delta_l = L_t - L_{t'} = L_{t'} \cdot \lambda(t - t').$$

On peut trouver une expression permettant de calculer L_t en fonction de $L_{t'}$, avec une approximation souvent acceptable.

$$L_t = L_{t'} + L_{t'}\lambda(t - t') = L_{t'}[1 + \lambda(t - t')]. \qquad (5)$$

APPLICATIONS NUMÉRIQUES :

On connaît la longueur $L_{t'} = L_{20} = 40$, d'une pièce en acier à la température $t' = 20°$.

1° **Calculer l'allongement** de la pièce quand sa température devient $t = 50°$.

La relation (4) donne :

$$\Delta_l = L_{t'}\lambda(t - t') = 40 \times 0{,}000012\ (50 - 20)$$
$$= 40 \times 0{,}000012 \times 30 = 0{,}0144 \text{ mm} = 14{,}4\ \mu.$$

La cote de la pièce devient :

$$L_t = L_{t'} + \Delta_l = 40 + 0{,}0144 = 40{,}0144.$$

2° **Calculer la contraction** de cette pièce quand elle passe de la température $t' = 20°$ à la température $t = 10°$.

La relation (4) donne :

$$\begin{aligned}\Delta_l &= L_{t'}\lambda(t - t') = 40 \times 0{,}000012\,(10 - 20)\\ &= -\,40 \times 0{,}000012 \times 10 = -\,0{,}0048 \text{ mm}\\ &= -\,4{,}8\,\mu.\end{aligned}$$

La cote de la pièce devient :

$$L_t = L_{t'} + \Delta_l = 40 - 0{,}0048 = 39{,}9952.$$

2° Incertitudes résultant des dilatations et des contractions des appareils de mesure.

Les appareils de mesure à dimensions variables (pieds à coulisses, palmers, etc...) et les vérificateurs à dimension fixe (cales étalons, tampons cylindriques, jauges plates, calibres-mâchoires, etc...) sont en acier.

On les étalonne à la température de 20°.

En réglant à la cote 40, par exemple, un palmer supposé exact, l'écartement entre les touches est de 40 mm lorsque l'appareil est à la température de $t' = 20°$. Quand le palmer est à une température inférieure à 20°, $t = 10°$, par exemple, l'écartement des touches est inférieur à 40 mm.

La différence des écartements qui résulte de la contraction du métal se calcule à l'aide de la relation (4) dans laquelle il faut prendre : $t' = 20°$, $L_{t'} = L_{20} = 40$, $t = 10°$.

On a : $\Delta_l = L_{t'}\lambda(t - t') = 40 \times 0{,}000012\,(10 - 20) = -\,0{,}0048$ mm
$= -\,4{,}8\,\mu.$

Quand le palmer est à une température $t = 30°$, supérieure à 20°, l'écartement des touches du palmer est supérieur à 40 mm. L'écartement des touches a augmenté d'une quantité :

$$\begin{aligned}\Delta_l &= L_{t'} \cdot \lambda(t - t') = 40 \times 1{,}2 \times 10^{-5}(30 - 20) = 0{,}0048 \text{ mm}\\ &= 4{,}8\,\mu.\end{aligned}$$

Le même raisonnement pourrait être appliqué à une cale étalon de 40, à la partie mini d'un tampon de 40 H7, à l'écartement maxi d'un calibre-mâchoire de 40 *h*7 ; il conduirait aux mêmes résultats.

Ainsi, les variations des dimensions des vérificateurs en fonction de la température sont à peu près égales et quelquefois même (cales étalons) supérieures aux tolérances de fabrication de ces appareils.

On conçoit dès lors que les constructeurs et les utilisateurs d'appareils de contrôle ne puissent être indifférents à l'influence de la température dans les mesures industrielles.

3° Incertitude résultant de la lecture de la cote lorsqu'on utilise un vérificateur à une température différente de la température d'étalonnage.

A la température d'étalonnage (20°), les cotes gravées sur les vérificateurs à dimension fixe (cales étalons, tampons, calibres-mâchoires), les cotes lues sur les appareils de mesure à dimensions variables (tambour gradué du palmer, vernier du pied à coulisse) correspondent exactement aux dimensions des appareils.

Nous avons vu que la dimension d'un appareil de mesure varie avec sa température.

Par contre, la cote indiquée reste toujours égale à la dimension qu'avait le vérificateur à la température d'étalonnage.

Supposons qu'un palmer ait été réglé à la cote 40. A la température d'étalonnage de 20°, l'écartement des touches est de 40 mm.

Quand le palmer est à la température de 30°, l'écartement des touches sera de :

$$40 + 0{,}0048 = 40{,}0048 \text{ mm},$$

tandis que l'examen des graduations du tambour gradué conduit à attribuer à cet écartement la valeur 40 mm.

4° Contrôle des dimensions des pièces en cours de fabrication.

Pour ne pas compliquer inutilement cette étude, nous négligeons systématiquement les erreurs qui n'ont pas pour cause les variations de température et qui peuvent notamment résulter des imperfections mécaniques ou géométriques des vérificateurs.

Les notations suivantes ont été adoptées pour l'ensemble de l'exposé qui va suivre :

L_t, L_T, L_{20} représentent les dimensions réelles de la pièce, aux températures t, T, 20° ;

l_t, l_{20} représentent les dimensions réelles du vérificateur, aux températures t et 20° ;

$\lambda = 1{,}2 \times 10^{-5}$ est le coefficient de dilatation linéaire de l'acier,

$\lambda' = 2{,}3 \times 10^{-5}$ celui de l'aluminium et de ses alliages.

Les mesures des dimensions des organes mécaniques ont pour objet la comparaison des cotes des pièces avec celles des vérificateurs en acier.

Sur les dessins d'exécution, les cotes indiquées correspondent aux dimensions que doivent avoir les pièces à 20°, température d'étalonnage des vérificateurs.

L'incertitude de la fabrication est donc caractérisée par la différence existant entre les cotes des pièces à 20° (L_{20}) et celles des vérificateurs à 20° (l_{20}), c'est-à-dire par l'expression :

$$\Delta_l = L_{20} - l_{20}.$$

Si Δ_l est positif, la cote de la pièce est trop grande.

Si Δ_l est négatif, la cote de la pièce est trop faible.

L'étude intéressant les incertitudes relatives aux mesures effectuées étant assez complexe, nous avons été amené à examiner successivement plusieurs cas types :

a) ***Le vérificateur et la pièce sont à la même température t au moment de la mesure et ont le même coefficient de dilatation*** λ.

Nous nous proposons, par exemple, de contrôler une pièce en acier dont la hauteur doit avoir 40 mm (cote portée sur le dessin).

On utilise une cale étalon de 40 et un comparateur ; la mesure se fait à 10°, température commune à la pièce et à la cale (voir *fig.* 8).

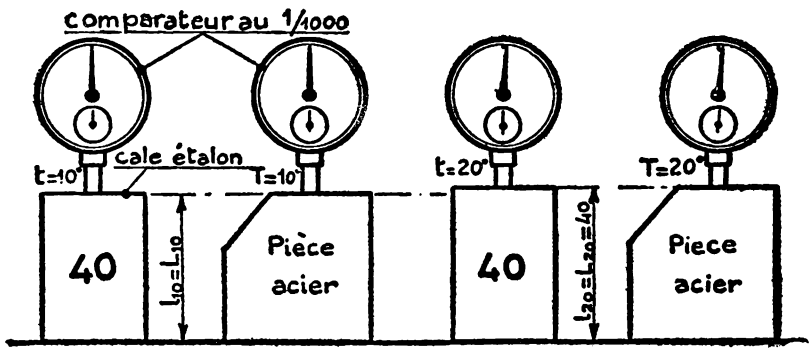


Fig. 8.

Première mesure :	Deuxième mesure :
La pièce et le vérificateur en acier sont à la température de 10°.	La pièce et le vérificateur en acier sont à la température de 20°.

La cote de la cale à 20° a pour valeur : $l_{20} = 40$.

Quand le comparateur, en contact avec la cale et la pièce, donne la même indication, on peut conclure que ces deux objets ont, à la température de mesure $t = 10°$ par exemple, la même dimension.

On peut écrire : $l_{10} = L_{10}$.

Comparons maintenant les dimensions de la cale et de la pièce à 20°.

La relation (5) $\quad L_t = L_{t'}[1 + \lambda\,(t—t')]$

nous donne,

pour la cale : $40 = l_{20} = l_{10}\,[1 + 1{,}2 \times 10^{-5}\,(20—10)]$;

pour la pièce : $\quad L_{20} = L_{10}\,[1 + 1{,}2 \times 10^{-5}\,(20—10)]$.

Comme la mesure nous donne :

$$l_{10} = L_{10}$$

il est facile de voir que $l_{20} = L_{20}$ et l'incertitude devient nulle :

$$\Delta_l = L_{20} — l_{20} = 0.$$

On établirait, de même, que la pièce et le calibre gardent la même dimension à toutes les températures.

b) ***Le vérificateur et la pièce sont à la même température t au moment de la mesure mais n'ont pas le même coefficient de dilatation.***

La cote de la pièce portée sur le plan est l_{20}. Cette cote nous permet de choisir la cale étalon utilisée pour la mesure.

Nous supposons le vérificateur en acier ($\lambda = 1{,}2 \times 10^{-5}$) et la pièce en aluminium ($\lambda' = 2{,}3 \times 10^{-5}$).

Adoptons le même procédé de vérification ; il conduit à comparer la cote de la pièce avec celle d'une cale étalon dont la dimension à 20° est l_{20} (cote portée sur le plan).

La mesure s'effectue à $t°$; le comparateur indique la même déviation lorsqu'il est en contact avec la pièce et lorsqu'il est en contact avec la cale.

On peut écrire :

$$L_t = l_t.$$

Comparons les cotes de ces deux éléments à la température d'étalonnage 20° :

On a,

pour la pièce : $L_{20} = L_t[1 + \lambda'\,(20—t)]$

pour la cale : $l_{20} = l_t[1 + \lambda\,(20—t)]$;

comme $L_t = l_t$ on voit que L_{20} est différent de l_{20}.

L'incertitude résultant de la mesure peut s'exprimer par la relation :

$$\begin{aligned}\Delta_l &= L_{20} — l_{20} \\ &= L_t[1 + \lambda'(20 — t)] — l_t[1 + \lambda'(20 — t)] \\ &= l_t(\lambda' — \lambda)\,(20 — t). \qquad (6)\end{aligned}$$

APPLICATION NUMÉRIQUE :

A 10° on contrôle l'égalité de cote d'une pièce en duralumin et d'une cale étalon de 40 mm en acier. Calculer l'incertitude résultant de la mesure (voir *fig.* 9).

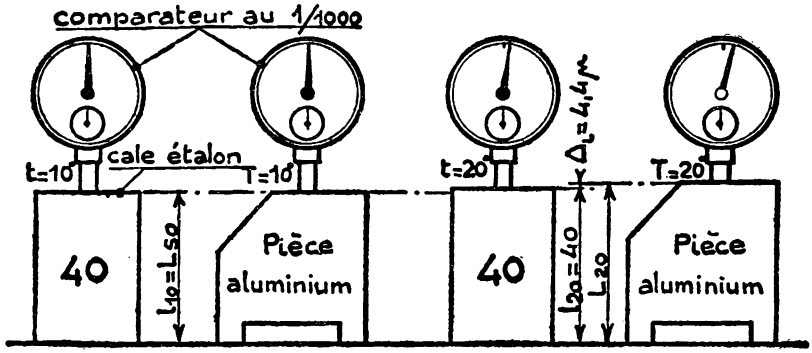


Fig. 9.

Première mesure :

La pièce est en aluminium, coef. de dilatation λ'. Le vérificateur est en acier, coef. de dilatation λ. La pièce et le vérificateur sont à la même température t°.

Deuxième mesure :

La pièce en aluminium et le vérificateur en acier sont à la température d'étalonnage de 20°.

La cale étalon utilisée a une cote $l_{20} = 40$ à 20°. Sa dimension, à $t = 10°$, a une valeur donnée par la relation (5) :

$$l_t = l_{t'}[1 + \lambda(t - t')]$$

soit :

$$\begin{aligned} l_t &= l_{20}[1 + (t - 20)] \\ &= 40[1 + 0{,}000012\,(10 - 20)] \\ &= 40 - 40 \times 0{,}000012 \times 10 = 39{,}995 \text{ mm.} \end{aligned}$$

La relation (6) permet de calculer l'incertitude résultant de la mesure

$$\begin{aligned} \Delta_l &= l_t(\lambda' - \lambda)\,(20 - t) = 39{,}995\,(2{,}3 - 1{,}2)\,10^{-5}(20 - 10) \\ &= 0{,}0044 \text{ mm} = 4{,}4\,\mu. \end{aligned}$$

Cette application numérique montre que l_t étant en général très voisin de l_{20}, on peut, sans modifier sensiblement les résultats, remplacer dans la relation (6) l_t par l_{20}. La relation permettant de chiffrer l'incertitude de la mesure devient donc :

$$\Delta_l = L_{20} - l_{20} = l_{20}(\lambda' - \lambda)\,(20 - t), \qquad (7)$$

t étant la température commune à la pièce et au vérificateur au moment de la mesure.

Le signe de Δ_l donne la position de L_{20} par rapport à l_{20} :

Si $\Delta_l > 0$, la dimension de la pièce à la température d'étalonnage est trop grande.

Si $\Delta_l < 0$, elle est trop faible à la température d'étalonnage.

Conclusions :

Une pièce sera contrôlée avec le minimum d'incertitude :

1° Si la pièce et le vérificateur sont à la même température.

2° Quand la mesure s'effectue à 20°, température d'étalonnage des vérificateurs.

Lorsque la pièce et le vérificateur ont le même coefficient de dilatation, il est possible d'effectuer les mesures à toutes les températures.

Comme pratiquement on n'est jamais sûr que cette condition soit remplie, les mesures de haute précision se font dans les laboratoires isothermes, maintenus constamment à 20°.

La valeur importante trouvée pour Δ_l montre qu'en mécanique de précision, où l'acier et les alliages légers ou cuivreux sont utilisés, le projeteur doit se préoccuper de l'influence des variations de température qui peuvent, en modifiant les dimensions des pièces, changer la nature des ajustements.

c) *La pièce et le vérificateur ne sont pas à la même température mais les coefficients de dilatation sont égaux.*

Pendant l'usinage, les pièces s'échauffent. Il n'est pas rare de constater que leur température T est supérieure de 20 à 30° à la température ambiante.

Les vérificateurs mis à la disposition de l'ouvrier sont à la température t de l'atelier.

L'ouvrier qui vérifie la cote d'une pièce chaude avec un vérificateur froid effectue une mesure imprécise. Nous allons calculer l'incertitude résultant de cette mesure :

La cote de la pièce, portée sur le dessin, est égale à celle du vérificateur à 20°, soit l_{20}.

La pièce est à la température T ; sa dimension est L_T.

Le vérificateur est à la température ambiante t ; sa dimension est l_t.

La vérification de la pièce se traduit par la relation :

$$L_T = l_t.$$

Comparons les cotes de la pièce et du vérificateur à 20°.

On peut écrire : $l_{20} = l_t[1 + \lambda(20 - t)]$

et : $L_{20} = L_T[1 + \lambda(20 - T)]$.

Comme $L_T = l_t$, on a $L_{20} = l_t[1 + \lambda(20 - T)]$.

L'incertitude de la mesure effectuée est représentée par la valeur :

$$\Delta_l = L_{20} - l_{20}$$

ou

$$\Delta_l = l_t[1 + \lambda(20 - T)] - l_t[1 + \lambda(20 - t)]$$
$$= l_t \lambda(t - T).$$

Comme nous l'avons fait précédemment, t étant toujours voisin de 20°, on peut remplacer l_t par l_{20} sans modifier sensiblement le résultat.

On a donc : $\Delta_l \simeq l_{20}\lambda(t - T)$. (8)

Comme T est le plus souvent supérieur à t, Δ_l est négatif : la pièce, à la température d'étalonnage, a une cote inférieure à celle du vérificateur (voir *fig.* 10).

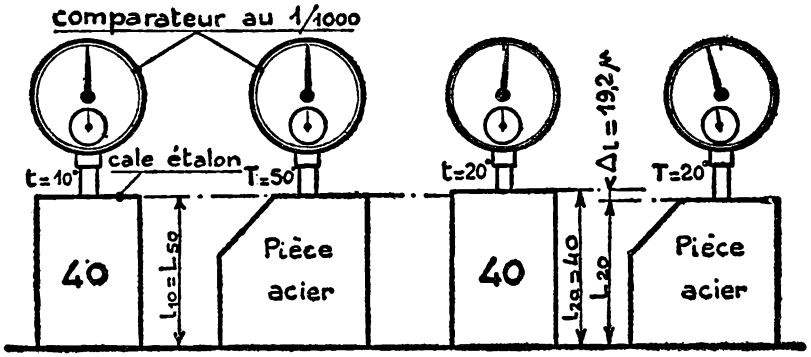


Fig. 10.

Première mesure :	Deuxième mesure :
La pièce en acier est à la température T = 50°. Le vérificateur est à la température t = 10°.	La pièce et le vérificateur en acier sont à la température d'étalonnage de 20°.

Application numérique :

Une pièce en acier est cotée 40 mm. On la vérifie immédiatement après usinage, quand sa température peut être évaluée à 50° avec un vérificateur à 10°.

L'incertitude de la mesure Δ_l a pour valeur :

$$\Delta_l = l_{20}\lambda(t - T) = 40 \times 1{,}2 \times 10^{-5} \times (10 - 50)$$

ou $$= -0{,}0192 = -19{,}2\,\mu.$$

L'abaque représenté sur la *figure* 11 permet de résoudre rapidement la relation (8).

Conclusions :

L'importance de l'erreur que nous venons de calculer explique les soucis des préparateurs de travail et des ouvriers qui se trouvent contraints à prendre d'utiles précautions pour obtenir des pièces précises.

Le préparateur qui doit étudier la gamme d'usinage d'une pièce comportant des tolérances assez faibles prévoit la fabrication en deux temps :

1° *Dégrossissage de toutes les pièces* : l'échauffement des pièces est important, mais la précision de la mesure n'est pas indispensable.

2° *Finition* : cette opération est faite quand les pièces se sont refroidies. L'échauffement du métal résultant du travail de coupe est très faible ; ainsi, les pièces et les vérificateurs étant sensiblement à la même température, les mesures sont précises. Un arrosage important contribue d'ailleurs à réaliser l'équilibre de température.

L'ouvrier, devant effectuer des mesures sur des pièces échauffées par le travail de coupe, sait qu'il doit engager à peine le « maxi » du calibre-mâchoire (côté *entre*) lorsqu'il vérifie un extérieur, ou faire pénétrer très peu le « maxi » du tampon ou de la jauge (côté *n'entre pas*) lorsqu'il contrôle un alésage.

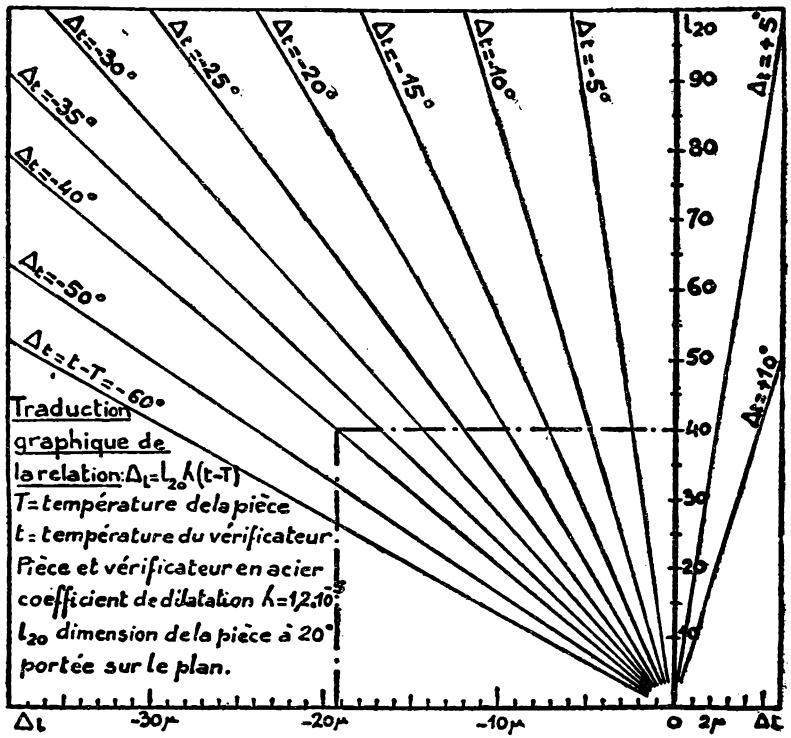


Fig. 11. — Abaque permettant de calculer les incertitudes résultant des mesures d'une pièce en acier, avec un vérificateur en acier, lorsque la pièce et le vérificateur ne sont pas à la même température.

d) *La pièce et le vérificateur ne sont pas à la même température et n'ont pas les mêmes coefficients de dilatation (pièce λ', vérificateur λ).*

La cote portée sur le plan est celle du vérificateur à 20°, soit l_{20}.

Si L_T est la cote de la pièce à la température T et l_t la cote du vérificateur à la température t, le contrôle de la pièce se traduit par l'égalité :

$$L_T = l_t.$$

Calculons l'incertitude de la mesure :

$$\Delta_l = L_{20} - l_{20}.$$

On a pour la pièce :

$$L_{20} = L_T[1 + \lambda'(20 - T)], \text{ soit, puisque } L_T = l_t,$$
$$L_{20} = l_t[1 + \lambda'(20 - T)]$$

et pour le vérificateur :

$$l_{20} = l_t[1 + \lambda(20 - t)].$$

L'incertitude Δ_l a pour valeur :

$$\Delta_l = L_{20} - l_{20} = l_t[1 + \lambda'(20 - T)] - l_t[1 + \lambda(20 - t)]$$
$$\Delta_l = l_t[\lambda'(20 - T) - \lambda(20 - t)].$$

Si on remplace l_t par l_{20}, on a :

$$\Delta_l \simeq l_{20}[\lambda'(20 - T) - \lambda(20 - t)].$$

Application numérique :

La pièce est en aluminium ($\lambda' = 2{,}3 \times 10$). $T = 50°, t = 10°$. Vérificateur en acier. Cote de la pièce : 40 mm (*fig.* 12).

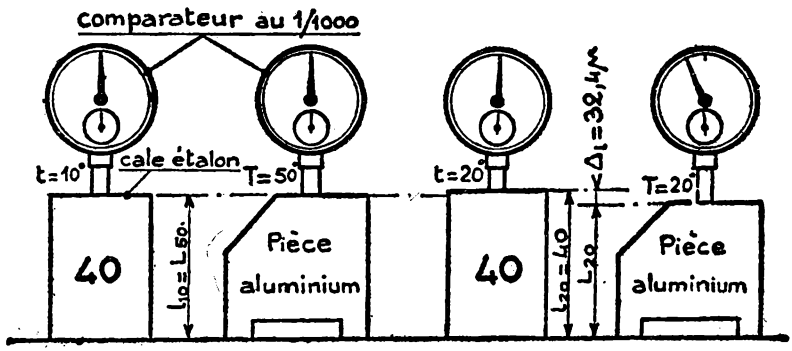


Fig. 12.

Première mesure :

La pièce est en duralumin ; sa température $T = 50°$. Le vérificateur est en acier ; sa température $t = 10°$.

Deuxième mesure :

La pièce en duralumin et le vérificateur en acier sont à la même température $t = 20°$.

L'incertitude de la mesure a pour valeur :

$$\Delta_l = 40[2{,}3 \times 10^{-5} \times (20 - 50) - 1{,}2 \times 10^{-5} \times (20 - 10)]$$
$$\Delta_l = -0{,}0324 = -32{,}4\,\mu.$$

L'erreur ainsi trouvée est supérieure à la tolérance de fabrication, qualité 7, de la pièce.

Cette étude montre toute l'importance que présentent les variations de température, non seulement sur la précision des mesures, mais aussi sur les conditions de fonctionnement des machines dont les éléments assemblés sont constitués par des métaux ayant des coefficients de dilatation différents.

Métrologie pneumatique

Principe

La métrologie pneumatique substitue, aux différences de longueur, des modifications de pression ; les variations d'énergie de l'air en mouvement qui en résultent peuvent être utilisées pour la mesure des dimensions, pour le contrôle des pièces exécutées en série ou pour la commande automatique des machines-outils.

Les appareils de mesure, ou **micromètres pneumatiques**, sont des comparateurs.

Ils garantissent précision, rapidité, constance des mesures pour les raisons suivantes :

1° L'amplification est très importante : elle peut aller jusqu'à 100 000.

2° Les résultats sont indépendants de l'opérateur.

3° La lecture de la cote est directe et, par suite, instantanée.

4° La mesure se faisant, le plus souvent, sans contact de la partie active avec la pièce, les effets de l'usure des organes sont très peu importants.

Par contre, ces appareils ne sont pas facilement transportables, car ils sont encombrants et doivent être reliés par tuyauterie à la source d'air sous pression.

Il existe plusieurs types d'appareils qui utilisent des pressions d'air différentes :

— Les appareils **Solex** utilisent de l'air sous faible pression : 100 à 200 gf/cm², soit 10^4 à 2×10^4 pascals (unité du système M.K.S.A.) ou 1 à 2 N/cm².

— Les appareils **Compac** consomment de l'air dont la pression est de 700 gf/cm², soit 7 N/cm².

— Les appareils **Etamic** fonctionnent avec de l'air dont la pression est supérieure à 3 kgf/cm², soit 30 N/cm².

Le micromètre pneumatique Solex

1° Principe de fonctionnement.

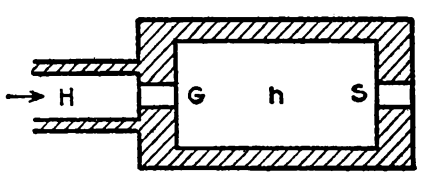


Fig. 1. — Principe de l'appareil Solex.

Deux orifices : G (gicleur de tête) et S (gicleur de sortie) étant placés en série, de l'air, à la pression initiale constante H, s'écoule à travers ceux-ci. La pression *h* qui règne entre G et S dépend du rapport de leurs sections. Si G a une section constante et S une section variable, la valeur de *h* diminue quand S augmente et inversement (*fig.* 1).

Considérons le dispositif de la *figure* 2. Si on donne à S une valeur assez grande par rapport à G, on peut faire varier le débit d'air à travers S en approchant ou en éloignant la paroi P. La section de sortie est égale à $2\pi R \times d$. Les variations de h correspondent donc aux variations de d.

Si on remplace S par 2 orifices diamétralement opposés (*fig.* 3), les variations de h nous renseignent sur les variations des cotes de la pièce à mesurer.

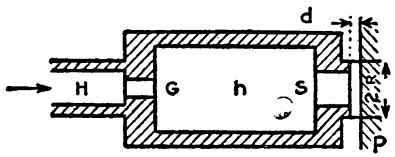


Fig. 2. — Principe de la mesure d'un jeu au micromètre Solex.

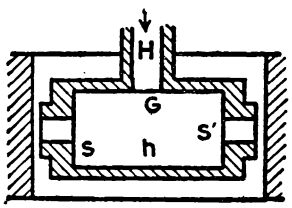


Fig. 3. — Principe de la mesure d'un alésage.

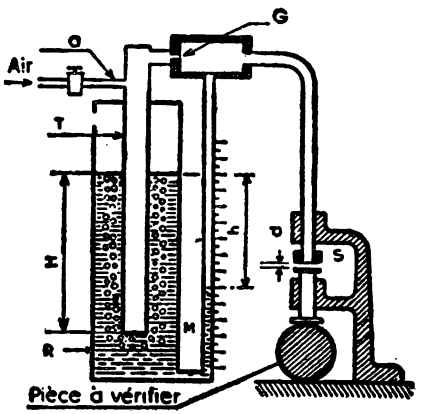


Fig. 4. — Schéma de principe de l'appareil Solex.

2° Description de l'appareil.

L'appareil Solex comprend, d'une part, le dispositif appelé « mano-détendeur », fournissant l'air à une pression rigoureusement constante et, d'autre part, des montages de mesure adaptés aux différents besoins. Le dispositif Solex schématisé sur la *figure* 4 groupe, dans un même appareil, le réservoir R à pression constante, le gicleur de tête G, le tube manométrique M donnant la pression h et une échelle graduée, placée à côté du tube. L'air sous pression venant d'un compresseur (une pression de quelques mètres d'eau est suffisante) arrive en a, se détend dans le tube T ; si sa pression dépasse H, l'excès de pression produit un départ d'air à travers l'eau. La pression est donc toujours égale à H dans T.

Le gicleur de tête G, vissé à la sortie du tube, débouche dans une chambre où règne une pression h, lue sur le tube manométrique M. Avant toute mesure, il convient de s'assurer que le niveau de l'eau colorée dans le réservoir R arrive bien au repère « niveau à l'arrêt ». Le montage représenté sur la *figure* 4 est celui qui permet la mesure d'une pièce cylindrique. Le débit du gicleur de sortie S dépend de la distance d qui varie suivant les différences existant entre les cotes de la pièce à mesurer. La lecture du niveau de l'eau sur le tube manomé-

trique donnera, en $\frac{1}{100}$ ou $\frac{1}{1\,000}$ de mm, la valeur de l'ovalisation ; on peut obtenir le diamètre de la pièce si on fait une autre mesure avec un tampon calibré de diamètre connu. Les appareils construits pour H = 0,50 m sont tels que $\frac{1}{100}$ de mm correspond à un déplacement de liquide de 100 mm. On peut donc apprécier facilement le millième de millimètre.

3° Applications du micromètre pneumatique.

a) *Amplificateur pour mesure de haute précision.*

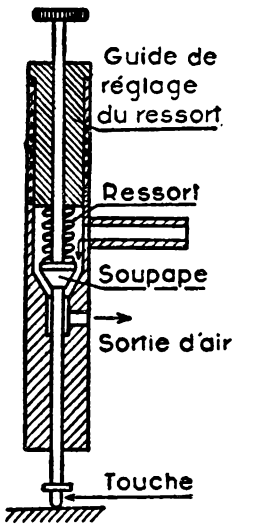


Fig. 5. — Amplificateur pour mesure de haute précision.

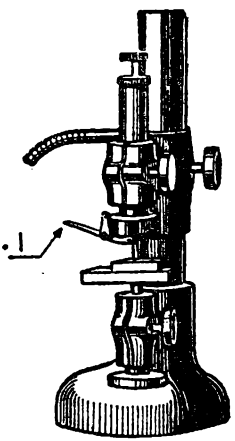


Fig. 6. — Amplificateur monté sur un socle.

L'amplificateur est constitué par un corps cylindrique à l'intérieur duquel se déplace une soupape d'un modèle spécial, maintenue sur son siège par un ressort.

Un ajutage, situé sur le côté, permet de le réunir, par une canalisation souple, au mano-détendeur, équipé avec un gicleur de tête et une échelle spéciale. La tige de la soupape se termine, à une extrémité, par un saphir (voir *fig.* 5).

Le déplacement de la soupape modifie la section de l'orifice de sortie et, par suite, la hauteur du liquide dans le tube.

L'amplificateur monté sur un socle (*fig.* 6) constitue un comparateur dont les avantages sont :

1° Déréglage impossible.

2° Robustesse considérable.

3° Grand dégagement de la touche à l'aide du levier *l*.

4° Pression de mesure réglable (1 N/cm²) pour les pièces fragiles.

5° Amplification considérable pouvant atteindre 20 000 (la *Précision mécanique* vérifie, avec un tel appareil, les cales Johansson, la précision de la mesure étant de $\frac{1}{20\,000}$ de mm).

L'amplificateur Solex peut enfin être utilisé à la place de l'amplificateur à aiguille.

b) *Mesure des alésages.*

1° Tampon à gicleur.

A l'extrémité du tube flexible adapté sur le mano-détendeur (*fig.* 7), on fixe un tampon spécial pour la mesure des alésages (voir *fig.* 8).

Ces tampons, en acier dur trempé, peuvent être utilisés pour mesurer des diamètres supérieurs ou égaux à 5 mm. Ils sont construits pour une cote nominale déterminée D. Lorsque le tampon est enfoncé dans un alésage dont le diamètre est exactement égal à D, le niveau du liquide dans le tube s'arrête en face du zéro de la réglette. Les tampons ont un diamètre sensiblement inférieur à celui du cylindre à contrôler. Le bossage du gicleur se trouve en retrait par rapport à la surface extérieure du tampon (voir *fig.* 9).
L'usure des tampons est donc nulle.

Ces appareils présentent, en outre, les avantages suivants :

Ils permettent la vérification de l'alésage en tous points et l'on peut ainsi mesurer la conicité et l'ovalisation des cylindres.

La mesure de la cote, entièrement indépendante de l'opérateur, se fait avec une haute précision.

2° Compas d'intérieur.

Description :

Le compas d'intérieur représenté par la *figure* 10 comprend essentiellement un amplificateur à soupape. L'air venant du micro-mesureur par une tuyauterie souple traverse l'intervalle situé entre la soupape et son siège ; son débit et, par suite, la pression enregistrée par le manomètre, dépend du degré d'ouverture de la soupape. L'amplificateur est vissé à l'intérieur d'un corps cylindrique, de telle sorte que la tige de la soupape repose sur une butée en équerre. Cette butée est solidaire d'une lame flexible dont l'extrémité, munie d'une touche sphérique, est en contact avec la paroi de la pièce à mesurer. A l'opposé de cette lame se trouve une pige cylindrique, réglable en position.

Exécution des mesures :

- Monter sur le manomètre l'échelle graduée et le gicleur de tête correspondant à l'amplificateur utilisé.
- Placer l'amplificateur de façon que la tige de soupape ne touche pas l'équerre.
- Régler la pige de façon que la distance L soit légèrement supérieure à la cote à mesurer : $L = C + 0{,}2$ (utilisation du pied à coulisse).
- Disposer dans une monture spéciale, entre deux becs d'intérieur, une combinaison de cales égale à C.
- Placer les deux touches du compas entre les deux becs et régler la position de l'amplificateur pour que le manomètre soit au zéro.
- Introduire le compas dans la pièce et lire sur le manomètre la différence entre la cote de la pièce et C.

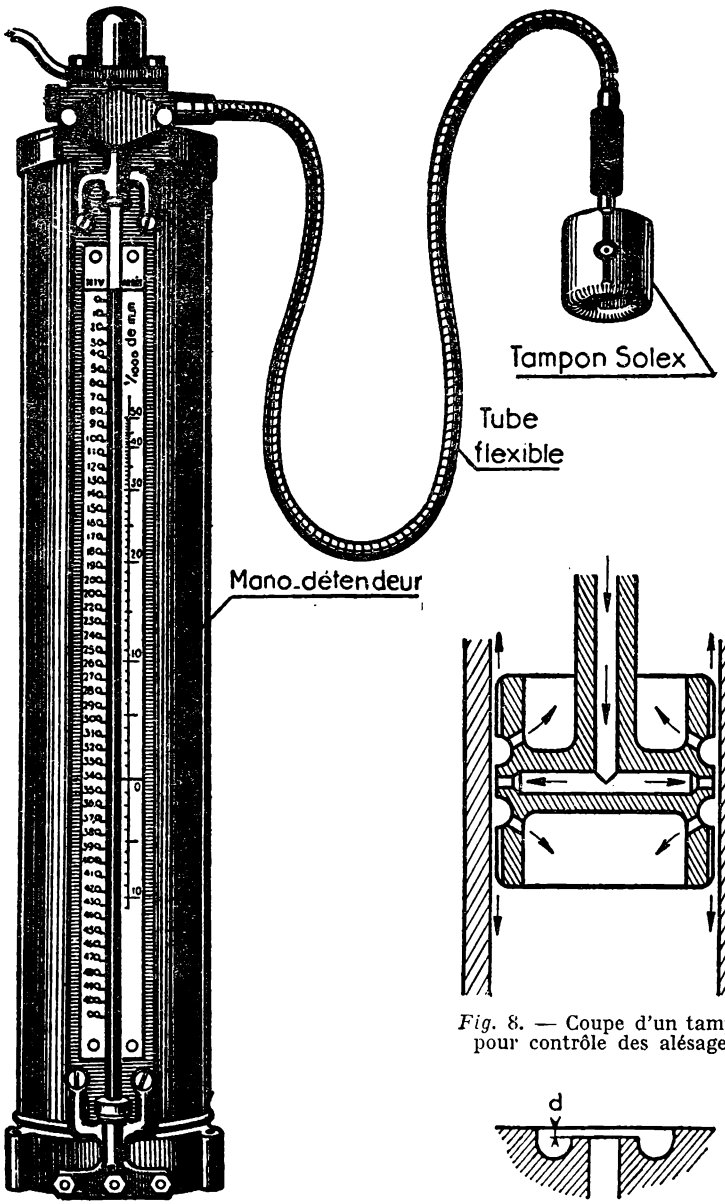


Fig. 7. — Mano-détendeur équipé avec un tampon.

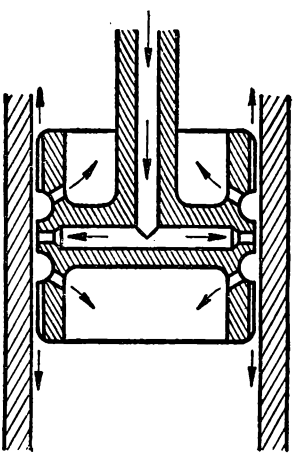
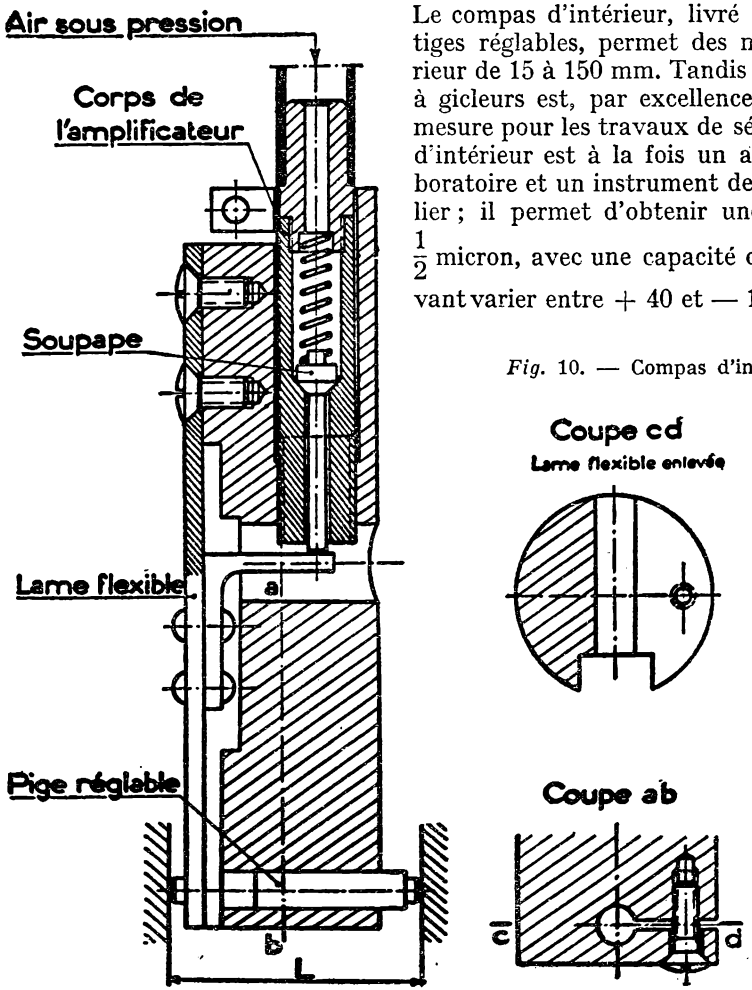


Fig. 8. — Coupe d'un tampon pour contrôle des alésages.

Fig. 9. — Détail de l'orifice de sortie d'air d'un tampon.



Le compas d'intérieur, livré avec plusieurs tiges réglables, permet des mesures d'intérieur de 15 à 150 mm. Tandis que le tampon à gicleurs est, par excellence, l'appareil de mesure pour les travaux de série, le compas d'intérieur est à la fois un appareil de laboratoire et un instrument de mesure d'atelier ; il permet d'obtenir une précision de $\frac{1}{2}$ micron, avec une capacité de mesure pouvant varier entre + 40 et — 160 microns.

Fig. 10. — Compas d'intérieur.

c) *Mesure des pièces cylindriques extérieurement.*

1° **Vés de mesure** (*fig.* 11).

Les vés de mesure permettent le contrôle des diamètres extérieurs pour des dimensions variant de 6 à 78 mm. C'est avec un jeu de trois vés (6/28-22/52-48/78) que l'on couvre les limites précitées.

Le vé de mesure permet d'effectuer des contrôles très rapidement et, particulièrement, de connaître la cote d'une pièce lorsqu'elle est encore sur machine. La capacité de mesure pourra varier de 40 à 150 microns, la plus grande sensibilité atteignant 1/2 micron.

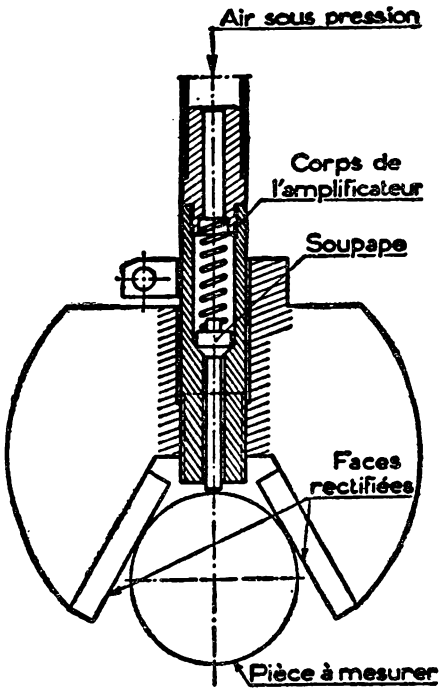


Fig. 11. — Vé de mesure.

Le vé de mesure est aussi facile à utiliser qu'un calibre-mâchoire, sur lequel il présente une supériorité, celle de permettre de lire l'erreur de cote.

Mode opératoire :

— Régler avec un tampon la hauteur de la soupape pour que le manomètre soit au zéro.

— Mesurer ensuite la pièce et lire sur le manomètre la différence des cotes du tampon et de la pièce.

2° Cés et palmers de mesure.

Les cés et les palmers de mesure comportent deux touches, l'une fixe, l'autre mobile : celle de l'amplificateur est reliée au micro-mesureur.

Les cés et les palmers peuvent être fixés sur un axe horizontal, afin de faciliter la mesure. A cet effet, ils comportent un alésage permettant une immobilisation par friction.

Les cés sont monoblocs en fonte (*fig.* 12). Les palmers se composent d'un tube support, sur lequel sont fixés deux bras symétriques et un collier d'orientation permettant de monter l'ensemble sur un axe (*fig.* 13).

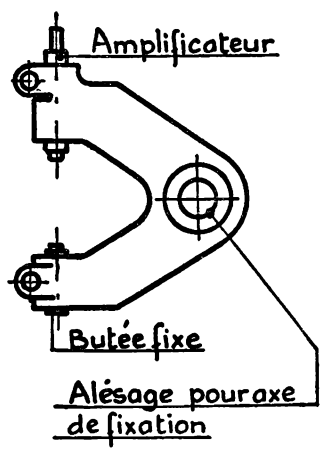


Fig. 12. — Cé de mesure.

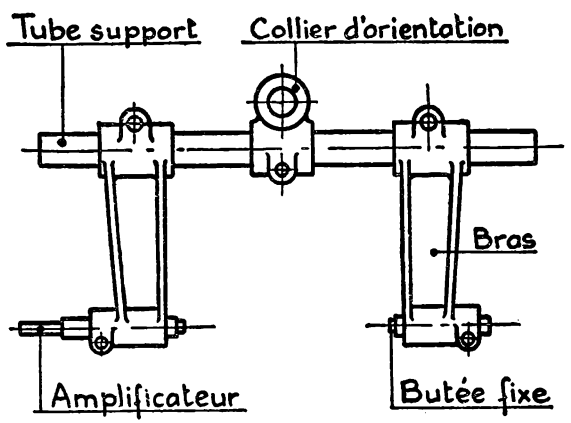


Fig. 13. — Palmer de mesure.

Principe d'une mesure :

On règle, avec des cales étalons, l'écartement entre les touches, de façon que le niveau de l'eau dans le tube soit en face du zéro de la réglette.

En présentant la pièce, on lit la différence entre la cote de la pièce et celle de la combinaison de cales.

d) *Vérification des calibres-mâchoires (fig. 14).*

Cette vérification nécessite l'emploi de cales à gicleur qui sont exécutées avec la même précision que les cales étalons. Elles ont une épaisseur de 4 mm et lorsque, assemblées par deux, elles sont introduites dans un calibre de 8 exactement, le liquide du mano-détendeur s'arrête au zéro de l'échelle. Pour faire une mesure, on réalise, avec les cales étalons et les cales à gicleur, une combinaison légèrement inférieure à la cote à mesurer. La lecture de la différence des cotes se fait directement sur la règle graduée.

Avantages de la mesure :

Pas d'usure de l'appareil ni de tâtonnements comme dans l'emploi de cales étalons seules. Rapidité de lecture.

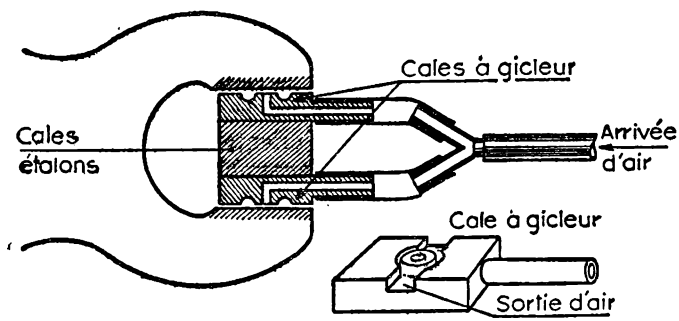


Fig. 14. — Vérification des calibres-mâchoires au moyen de cales étalons et cales à gicleur.

e) *Mesure des petits orifices et des fuites.*

Le micromètre peut être utilisé pour la mesure des petits orifices. On peut obtenir directement la section des orifices de 0,1 à 2 mm de diamètre.

Application :

Aiguilles d'injection des moteurs Diesel. On peut même, la règle étant graduée en mm^2, déterminer la section des orifices de forme quelconque, c'est-à-dire des fuites.

f) *Applications diverses.*

Mesures très précises des épaisseurs avec enregistrement des cotes (film de cinéma sonore). Mesure du diamètre des fils. Mesure des déformations des pièces soumises à des efforts statiques. Mesure extrêmement précise du déplacement des chariots porte-outil des machines (vernier pneumatique). Mesure des variations de cotes des pièces courbes (sphéromètre).

g) *Adaptation du micromètre pneumatique Solex à la commande des machines-outils.*

Plusieurs solutions peuvent être adoptées, notamment pour la commande des machines à rectifier :

— **Commande directe par relais.**

On dispose d'un appareil, semblable au micromètre pneumatique Solex, dont le gicleur de sortie S est constitué par la fuite d'air en face de la pièce usinée (*fig.* 15).

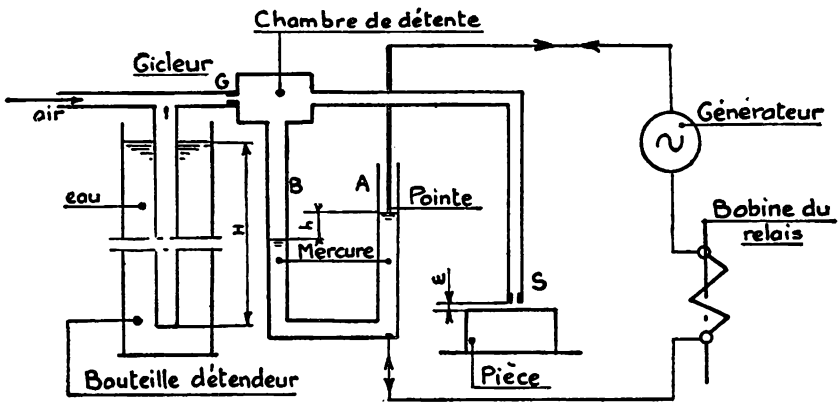


Fig. 15. — Utilisation du micromètre Solex pour la commande directe du moteur des avances d'une machine-outil.

L'air, amené à pression constante grâce à un compresseur et une bouteille à eau servant de détendeur, traverse un gicleur de tête G et débouche dans une chambre de détente. Un manomètre à mercure permet de mesurer la pression de l'air.

Quand le gicleur de sortie S est fermé, les pressions de l'air, avant et après G, sont les mêmes et égales à la pression atmosphérique, augmentée de la pression produite par une hauteur d'eau égale à H. La différence de hauteur du mercure h représente alors l'équivalent en pression de H et on a : $h = \frac{H}{13{,}6}$. Quand la chambre de détente est mise directement à l'air libre, la pression qui y règne est égale à celle de l'atmosphère et $h = 0$.

Entre ces deux limites, il règne dans la chambre de détente une pression qui est fonction de la section de l'orifice de sortie de l'air, donc du jeu ε. On se sert de la variation de hauteur du mercure dans la branche A du manomètre, qui est à l'air libre, pour alimenter le relais du contacteur qui commande le moteur de positionnement de la meule.

Quand S est bouché, le niveau du mercure dans la branche A est au maximum. Quand ε augmente, le niveau baisse. On peut donc disposer une électrode plongeant dans le mercure, qui assure ainsi le passage du courant dans la bobine du relais. Tant que la pointe de l'électrode est immergée, le courant passe, la meule travaille. Quand l'usinage se produit, ε augmente puisque nous supposons le gicleur S en position fixe. Le niveau du mercure dans A baisse et le courant peut ainsi être coupé. Le relais cesse d'être alimenté et, le contacteur agissant, la meule recule : la pièce est à la cote. Il est bien évident que la bouteille détendeur doit avoir une grande hauteur (1,50 m à 2 m), on aura ainsi un déplacement du niveau dans le tube A acceptable.

— **Commande avec amplificateur électronique.**

On utilise les éléments d'un micromètre pneumatique Solex (*fig.* 16). La bouteille contient de l'eau rendue conductrice de l'électricité.

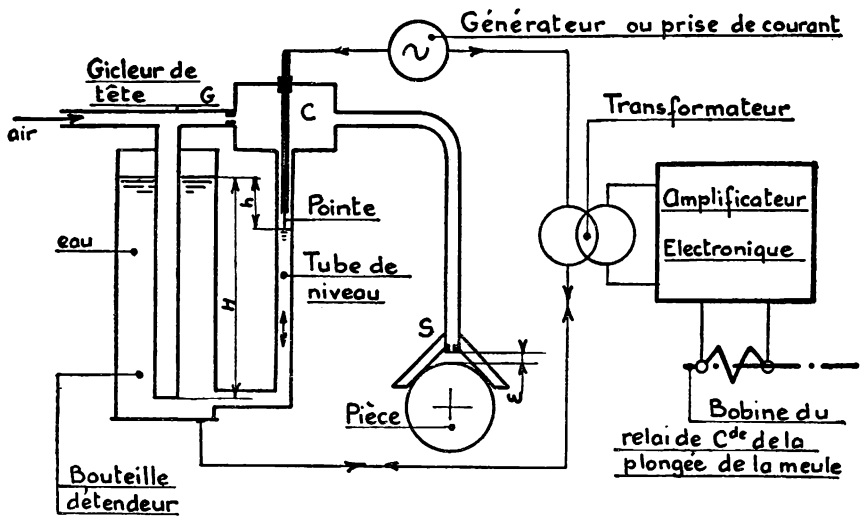


Fig. 16. — Utilisation du micromètre Solex pour la commande du moteur des avances d'une machine-outil avec amplificateur électronique.

Une électrode plonge dans le tube manométrique et permet, quand elle est immergée, l'alimentation en courant alternatif du primaire du transformateur. Un amplificateur à lampe permet d'alimenter convenablement le relais qui commande le contacteur du moteur assurant la plongée de la meule.

Quand S est bouché, la pression en C est égale à la pression en amont du gicleur de tête G. Donc le niveau du liquide est en bas du tube de niveau : on a $h = H$. Quand on met C à l'air libre, $h = 0$. Entre ces deux positions extrêmes, le niveau supérieur du liquide se déplace et sa position est fonction de la section du gicleur de sortie S, donc de la distance ε. Le gicleur S étant à position fixe, on peut régler la position de l'électrode pour que le courant soit coupé quand la pièce est à la cote.

Ce dispositif est plus sensible que le précédent, puisque les déplacements du niveau de l'eau sont bien supérieurs à ceux du mercure. Mais il nécessite l'emploi d'un amplificateur électronique. L'intensité du courant dans le liquide doit être très faible afin que les phénomènes d'électrolyse soient limités.

Comparateur à amplificateur pneumatique Compac

1° Description fonctionnelle.

C'est le principe du micromètre pneumatique Solex qui a été exploité différemment.

Rappelons ce principe :

Considérons une canalisation comprenant un régulateur, un étranglement biconique E (ajutage venturi) et un orifice de sortie S de faible diamètre, obturé plus ou moins par un obstacle qui peut être constitué par la pièce à vérifier (voir *fig.* 17).

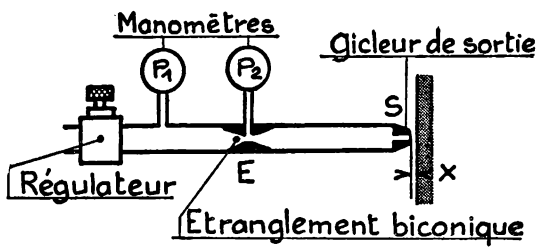


Fig. 17. — Principe du comparateur amplificateur Compac.

On constate :

a) Que la pression P_1 en amont de l'étranglement ne dépend que du réglage du régulateur.

b) Que la pression en aval de l'étranglement, ou celle qui existe au col du venturi P_2, varie quand la distance x est modifiée.

A de très faibles variations de la cote x correspondent des variations importantes de P_2, mais il n'y a pas proportionnalité entre les variations de x et celles de P_2.

L'appareil a été conçu pour obtenir cette proportionnalité (*fig.* 18).

Il comporte :

— un circuit de mesure,
— un circuit de lecture.

Le circuit de mesure est parcouru par l'air qui se dirige vers la pièce à contrôler.

Deux prises de pression, l'une en amont de l'étranglement, l'autre au col du venturi, sont raccordées à deux capsules manométriques susceptibles de se déformer suivant leur pression intérieure.

Ces deux capsules sont montées sur un fléau AB, suspendu en son milieu par un support flexible à lame D. Quand les pressions existant dans les capsules C_1 et C_2 varient, le fléau oscille légèrement : sa position est fonction de la distance x.

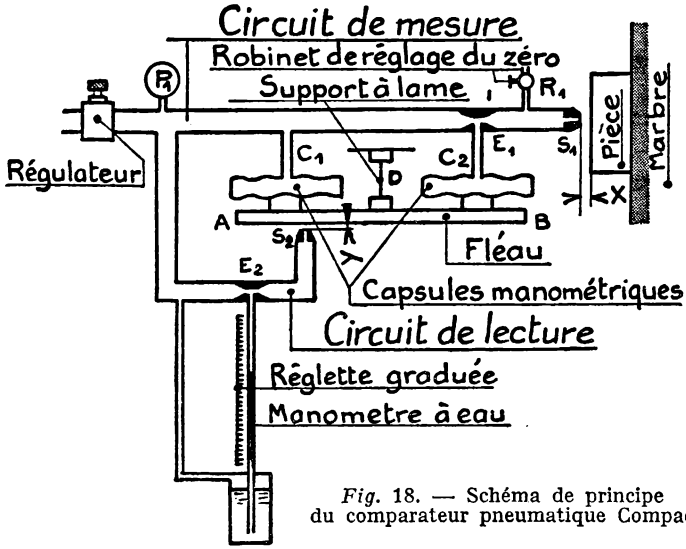


Fig. 18. — Schéma de principe du comparateur pneumatique Compac.

Le circuit de lecture comporte un étranglement et un ajutage de sortie. La différence de pression, au col du venturi et en amont de l'étranglement, est mesurée par un manomètre à eau.

La section de l'orifice de sortie S_2 est réglée par la position du fléau : elle en est éloignée de y.

Comme la position du fléau est fonction de la distance x de l'appareil à la pièce à mesurer, on conçoit que l'indication du manomètre à eau renseigne sur la valeur de x. Si l'on déplace la pièce parallèlement au bord du gicleur S_1, on peut lire, sur le manomètre à eau, la valeur des différences d'épaisseur de la pièce.

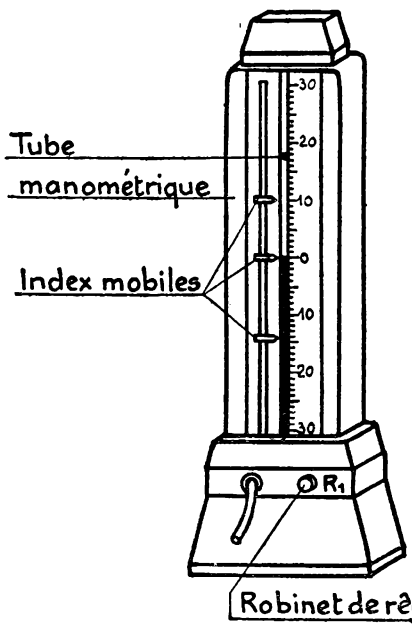
2° Caractéristiques de cet appareil.

— L'amplification de l'appareil est constante, quel que soit l'écart x à mesurer. Les graduations sur l'échelle manométrique sont donc égales (voir *fig.* 19).

— Chaque appareil est prévu pour une capacité de mesure de $\frac{6}{100}$, pour une longueur de tube de 360 mm, soit 6 mm sur l'échelle pour une différence de cote de $\frac{1}{1\,000}$.

— La position du sommet de la colonne d'eau peut être aisément réglée : il suffit d'agir sur le robinet de fuite R_1. Ainsi, on peut aisément régler la position du zéro.

— La précision de cet appareil est grande :
Erreur de fidélité : différence d'indication, à l'occasion de mesures répétées d'une même longueur : 0,3 μ.



Erreur de justesse : erreur de mesure dans un intervalle donné : ± 2 % de la lecture.
Sensibilité : plus petit écart de dimension qui produira un déplacement de la colonne d'eau : 0,3 μ.

— La pression de l'air, 7 N/cm², est suffisante pour assurer l'évacuation de toutes les souillures des pièces à l'endroit où l'on fait la mesure.

3° Utilisation.

L'appareil Compac est un appareil de fabrication récente. Doté d'instruments de mesure semblables à ceux du micromètre Solex, il permet de réaliser les mêmes mesures.

← *Fig.* 19. — Vue extérieure du comparateur pneumatique Compac.

Appareil pneumatique différentiel Etamic

L'appareil Etamic est basé sur le principe du *pont de Wheatstone*, appliqué aux écoulements pneumatiques et dans lequel le galvanomètre est remplacé par une capsule manométrique double à membrane élastique qui joue le rôle d'interrupteur et d'inverseur du courant.

Il comporte *un dispositif pneumatique*, qui traduit une variation de cote en variation de pression, et *un circuit électrique* commandé par la partie pneumatique, qui utilise cette différence de pression pour la mesure de la cote, par comparaison ou pour la commande automatique de la machine qui produit la pièce.

1° Principe.

L'appareil (*fig.* 20), alimenté par de l'air comprimé et détendu à une pression de 4 à 7 hpz (40 à 70 N/cm²) comporte deux canalisations qui sont reliées entre elles par une capsule manométrique. Cette capsule est constituée par une membrane souple, établissant ou coupant le courant électrique de part et d'autre de sa position d'équilibre.

Sur la première canalisation, sont disposés : en amont de la capsule, un gicleur calibré G_1 ; en aval, un gicleur de mesure S_1 disposé en face de la surface usinée.

Sur la seconde canalisation, sont placés : un gicleur calibré G_2 et un gicleur de réglage S_2 dont la section de l'orifice est réglée par une vis pointeau.

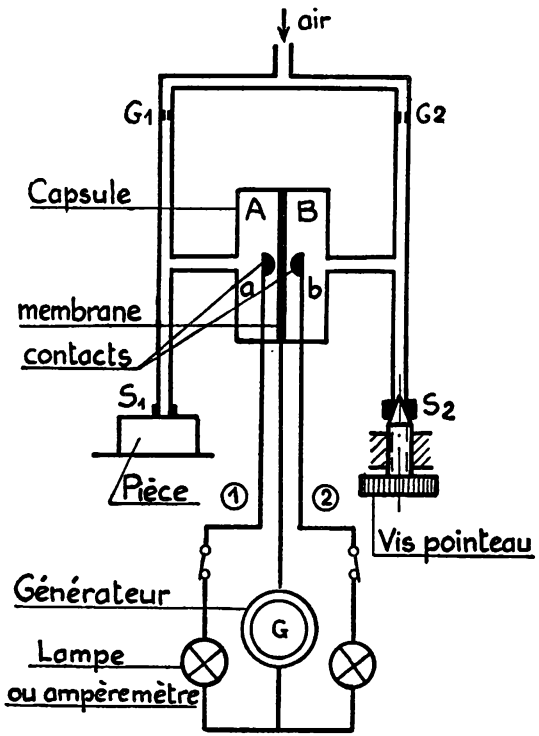


Fig. 20. — Schéma de principe de l'appareil pneumatique différentiel Etamic.

— Supposons fermés les deux orifices S_1 et S_2 (*fig.* 20) ; la pression est la même de chaque côté de la membrane : elle ne se déforme pas et elle ne touche ni avec un contact ni avec l'autre.

— Disposons, sous le gicleur de mesure S_1, une pièce à la cote exacte, de façon que sa distance à l'extrémité du gicleur soit ε. De l'air s'écoule par S_1, la pression baisse dans la partie A de la capsule. La membrane s'incurve et vient toucher le contact *a*, faisant passer le courant dans le circuit (1) : la lampe ou l'appareil de mesure monté sur ce circuit accuse le passage d'un courant électrique.

— Ouvrons le robinet à pointeau jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de pression dans les compartiments A et B de la capsule : aucun courant ne passe dans les deux circuits extérieurs (*fig.* 21).

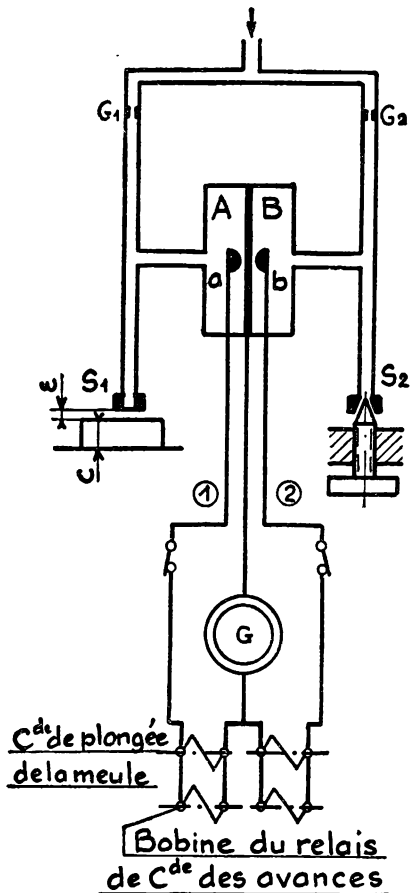


Fig. 21. — Appareil Etamic réglé au zéro, au moyen d'une cale étalon.

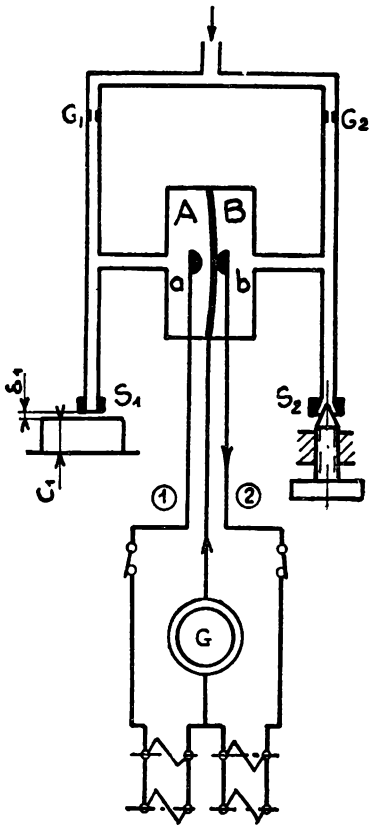


Fig. 22. — Appareil Etamic mesurant une pièce ayant une dimension supérieure à celle de la cale étalon.

— Remplaçons la pièce qui est à la cote exacte par une pièce dont la cote C_1 est supérieure à la cote C exacte : $C_1 > C$ (*fig.* 22).

L'orifice de sortie de l'air diminue, la pression en A est plus grande qu'en B, le contact s'établit en *b*, le circuit (2) est alimenté.

— Disposons, sous le gicleur S_1, une pièce de cote $C_2 < C$ (*fig.* 23). L'orifice de sortie de l'air augmente, la pression en B est plus grande qu'en A, le contact s'établit en *a* et le courant passe dans le circuit (1).

2° Utilisation de l'appareil.

Mesure des cotes.

L'appareil fonctionne comme un comparateur.

Supposons l'appareil réglé à une cote exacte. On passe une pièce de cote légèrement différente. Pour ramener l'appareil à zéro il suffit de modifier le réglage en vissant ou dévissant la vis pointeau. L'angle de rotation de cette vis peut être mesuré et il renseigne sur la cote de la pièce. Il suffit d'étalonner en conséquence le cadran devant lequel la vis se déplace.

Le mouvement de rotation de la vis est assuré par l'action de roues disposées sur un *basculeur* (*fig.* 24).

La membrane commande alternativement deux électro-aimants E_a et E_b qui attirent une palette, articulée en R et maintenue en position médiane par deux ressorts r_1 et r_2.

Cette palette entraîne un basculeur articulé autour de l'axe O qui est l'arbre de liaison entre un petit moteur électrique et la roue O.

Supposons l'appareil étalonné à la cote exacte, au moyen d'un empilage de cales. La membrane n'est pas déformée. Les électro-aimants ne sont pas excités, la palette est en position médiane : aucune roue ne touchant la vis, celle-ci est immobile.

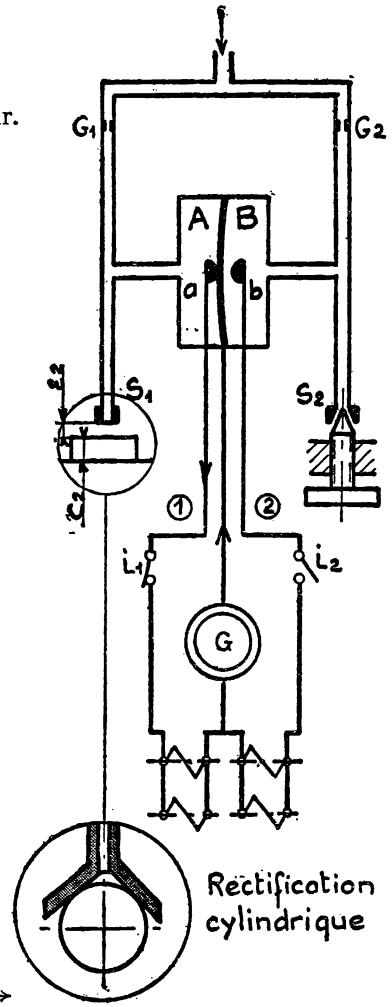


Fig. 23. — Appareil Etamic mesurant une pièce ayant une dimension inférieure à celle de la cale étalon.

— Si l'on présente une pièce trop épaisse, la membrane s'incurve du côté du contact *b* ; l'électro-aimant E_b est alimenté : la palette est attirée vers le bas, la roue O_1 entre en contact avec la vis qui se met à tourner suivant F. Le pointeau vient obturer de plus en plus l'orifice S_2, jusqu'au moment où, l'équilibre des pressions étant obtenu de chaque côté de la membrane, la palette revient à la position normale. La vis se trouve alors immobilisée. La lecture du cadran nous renseigne sur la différence de cote existant entre la pièce et la cale.

— Si la pièce a une cote inférieure à la cote exacte, la membrane s'incurve du côté *a*, l'électro-aimant E_a attire la palette. La roue O_1', qui tourne en sens

inverse de O_1, entre en contact avec la vis qui se met à tourner en sens contraire, suivant F'.

Ce comparateur Etamic est très précis et fidèle (0,8 μ).

A l'extrémité S_1 du comparateur, on peut monter des tampons, jauges, soupape amplificatrice, palmer, semblables à ceux qui sont utilisés sur l'appareil Solex.

Fonctionnement en limiteur d'usinage.

Supposons qu'il s'agisse de rectification extérieure.

Disposons, sur le circuit (1), les bobines de deux relais branchés sur le circuit de commande des moteurs de plongée de meule et d'avance de la table. Le circuit (2) est ouvert (*fig.* 23).

L'appareil est réglé pour que le courant s'établisse dans le circuit (1) quand la pièce est à la cote. Le courant, passant alors dans les bobines des relais, provoque l'arrêt du moteur de commande des avances et la *mise en route* du moteur qui commande le recul de la meule. Une butée à déclenchement électrique permet, en arrêtant ce moteur, de limiter le déplacement de la meule.

Le circuit (2) pourrait être utilisé, dans les mêmes conditions, pour la rectification intérieure.

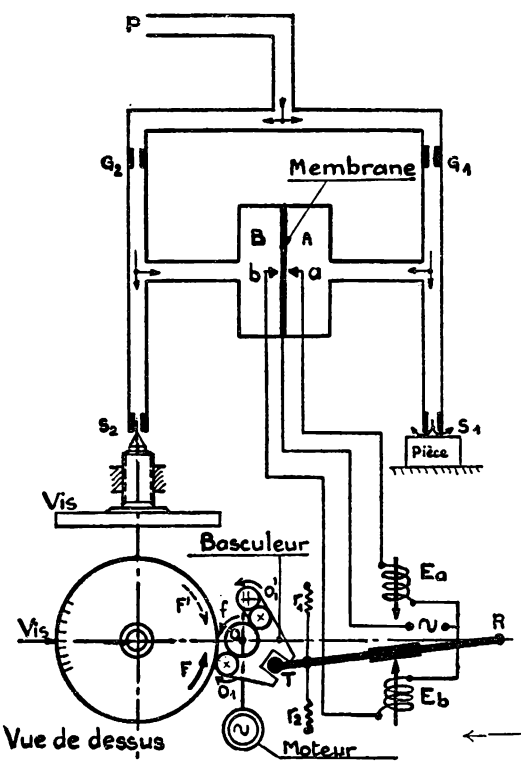


Fig. 24. — Appareil Etamic équipé pour la mesure de la cote.

Avantages des appareils Etamic.

Leur fonctionnement est indépendant de la pression de l'air.

La température n'a pas d'influence sur les réglages puisqu'il s'agit d'un système différentiel.

Les appareils ont un fonctionnement sans inertie. Une différence de cote de 1 micron entraîne un déplacement du centre de la membrane de 0,5 mm et un effort de contact de 5 N (0,5 kgf). Les contacts étant protégés par la capsule, qui est étanche, le fonctionnement ne peut être perturbé par des poussières venant de l'extérieur : il suffit d'utiliser de l'air sous pression, filtré.

Les jeux entre l'appareil de mesure et la pièce étant de l'ordre de 1/100 de mm, les mesures s'effectuent sans contact : elles sont donc stables.

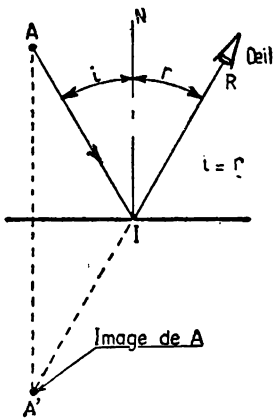


Fig. 1. — Réflexion de faisceau parallèle.

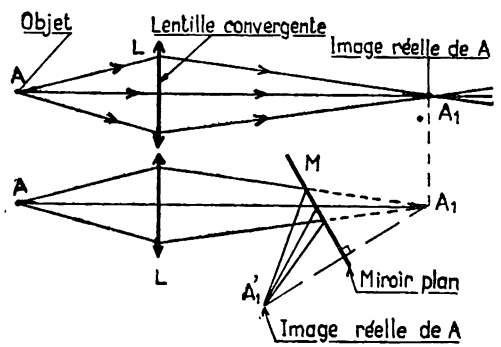


Fig. 2. — Réflexion de faisceau convergent.

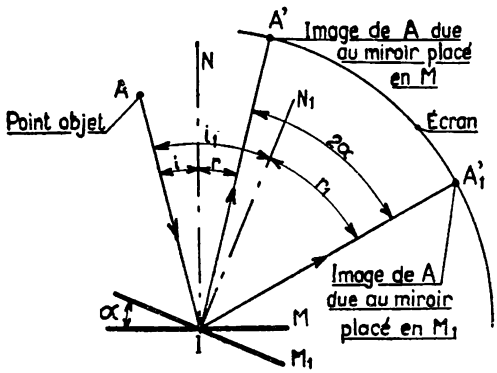


Fig. 3. — Déviation résultant de la rotation d'un miroir (méthode de Poggendorff).

Métrologie optique

RAPPEL DES NOTIONS D'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

1° Réflexion.

a) *Principe.*

La lumière se propage en ligne droite dans un milieu transparent homogène.

Un rayon lumineux quelconque, issu d'un point A et rencontrant un miroir plan en I, se réfléchit symétriquement à la normale IN au miroir, issue de I, en IR (*fig.* 1).

Le **rayon incident** AI et le **rayon réfléchi** IR sont dans un même plan : le **plan d'incidence**. Dans ce plan, l'**angle d'incidence** $\widehat{AIN} = \widehat{i}$ est égal à l'**angle de réflexion** $\widehat{NIR} = \widehat{r}$:

$$\widehat{i} = \widehat{r}.$$

Un œil situé sur le trajet du rayon réfléchi voit l'image de A en A′ symétrique de A par rapport au miroir.

b) *Réflexion de faisceau convergent (fig. 2).*

Une lentille convergente transforme, dans certaines conditions, un cône de rayons issu de A en un cône de rayons passant par un point A_1, image de A à travers la lentille.

Si nous plaçons un miroir plan M sur le trajet du faisceau convergent A_1, ce faisceau est réfléchi et les rayons sont renvoyés en un point A_1', symétrique du point A_1 par rapport au miroir ; A_1' est l'image de A. Cette image est dite **réelle** parce qu'elle peut être recueillie sur un écran.

c) *Miroir tournant (fig. 3).*

Lorsqu'un miroir tourne, d'un certain angle $\widehat{\alpha}$, autour d'un axe I perpendiculaire au plan d'incidence, le rayon réfléchi IA′ tourne d'un angle double, $\widehat{A'IA_1'} = 2\widehat{\alpha}$.

Ainsi, si l'on recueille l'image de A en A′ sur un écran circulaire, quand le miroir M tourne de l'angle $\widehat{\alpha}$, l'image s'est déplacée, sur l'écran, d'un arc $A'A_1'$ dont la mesure est $2\widehat{\alpha}$.

L'application de ce principe à la mesure des faibles déviations est due à Poggendorff. Elle a donné naissance à de nombreux appareils permettant la mesure de grandeurs électriques ou de longueurs.

2° Réfraction.

a) *Principe.*

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu homogène dans un autre milieu également homogène, il est dévié en restant dans le plan d'incidence.

S'il passe de l'air dans l'eau ou le verre, il se rapproche de la normale à l'inter-surface.

S'il passe de l'eau ou du verre dans l'air, il s'éloigne de la surface.

Examinons la *figure* 4.

Un point objet A, situé dans l'air, émet un rayon lumineux AI : rayon incident. La lumière pénètre dans l'eau contenue dans un cristallisoire et suit le trajet II_1 (**rayon réfracté**), tel que l'angle d'incidence $\widehat{NIA} = \widehat{i}$ est plus grand que l'angle de réfraction $\widehat{N'II_1} = \widehat{r}$.

On a :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

n est l'**indice de réfraction** de l'eau par rapport à l'air. Il a pour valeur :

$$n \frac{\text{eau}}{\text{air}} = n_1 = \frac{4}{3}.$$

Celui du verre par rapport à l'air a pour valeur :

$$n \frac{\text{verre}}{\text{air}} = n_2 = \frac{3}{2}.$$

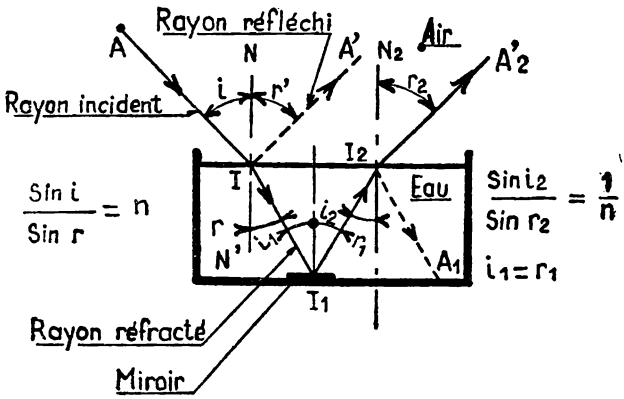


Fig. 4. — Réfraction d'un faisceau parallèle.

Nous remarquons qu'en arrivant à la surface de l'eau, une petite partie de la lumière s'est réfléchie suivant IA'. On a évidemment : $\widehat{i} = \widehat{r'}$.

Si nous plaçons un miroir plan M au fond du cristallisoire, le rayon réfracté II_1 se réfléchit suivant I_1I_2 ($\widehat{i_1} = \widehat{r_1} = \widehat{r} = \widehat{i_2}$) ; il passe ensuite de l'eau dans l'air, en se réfractant suivant $I_2A'_2$, en s'éloignant de la normale.

On constate que, dans ce cas particulier : $\widehat{r_2} = \widehat{i}$.

Arrivant en I_2, une faible partie de la lumière se réfléchit suivant I_2A_1.

Le rapport $\frac{\sin i_2}{\sin r_2} = n'_1$, indice de réfraction de l'air par rapport à l'eau.

Mais, puisque $\widehat{i_2} = \widehat{r}$ et $\widehat{r_2} = \widehat{i}$,

$$\frac{\sin i_2}{\sin r_2} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{\frac{\sin i}{\sin r}}$$

et $$n\,\frac{\text{air}}{\text{eau}} = \frac{1}{n\,\frac{\text{eau}}{\text{air}}} = \frac{3}{4}.$$

De même, l'indice de l'air par rapport au verre

$$n\,\frac{\text{air}}{\text{verre}} = \frac{1}{n\,\frac{\text{verre}}{\text{air}}} = \frac{2}{3}.$$

Passage de la lumière de l'eau dans le verre.

On a :

$$n\,\frac{\text{verre}}{\text{eau}} = \frac{n\,\frac{\text{verre}}{\text{air}}}{n\,\frac{\text{eau}}{\text{air}}} = \frac{\frac{3}{2}}{\frac{4}{3}} = \frac{9}{8}.$$

En passant de l'eau dans le verre, la lumière se rapproche de la normale à l'intersurface.

De deux milieux transparents, le plus *réfringent* est celui qui a le plus grand indice de réfraction par rapport à l'air.

b) *Angle limite de réfraction (fig. 5).*

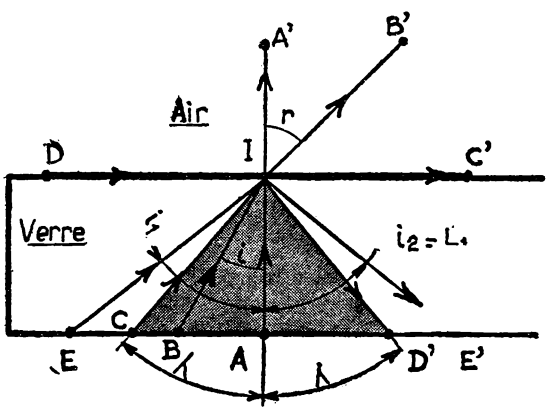


Fig. 5. — Réflexion totale : angle limite de réfraction.

Supposons une lame épaisse en verre.

Un rayon AI, perpendiculaire à l'intersurface plane DC', sort du verre suivant A'I, sans être dévié.

Un rayon BI, qui fait un angle $\widehat{i}$ avec la normale, sort du verre en s'éloignant de la normale, et on a :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n\,\frac{\text{air}}{\text{verre}} = \frac{2}{3}.$$

Pour un angle d'incidence $\widehat{CIA} = \lambda$, le rayon réfracté IC' est contenu dans l'intersurface.

Lorsque le rayon incident EI fait, avec la normale, un angle $\widehat{i_1}$ supérieur à λ, la lumière ne sort plus de la lame de verre : elle se réfléchit en totalité sur l'intersurface, suivant IE'. On dit qu'il y a **réflexion totale.**

L'angle λ est l'**angle limite de réfraction.**

Pour le passage de la lumière
du verre dans l'air, $\lambda = 41^o$
de l'eau dans l'air, $\lambda = 48^o\,30'$
du verre dans l'eau, $\lambda = 62^o\,30'$.

c) *Prisme à réflexion totale (fig. 6).*

Lorsqu'un rayon lumineux pénètre, perpendiculairement à une face, dans un prisme droit ayant pour base un triangle rectangle isocèle, il se réfléchit sur les autres faces parce qu'il les atteint en faisant avec elles un angle de 45° qui est supérieur à l'angle limite $\lambda = 41^o$.

Le rayon lumineux peut être ainsi dévié de 90° (*vue* 1) ou être simplement renvoyé dans une direction parallèle à la première (*vue* 2).

d) *Image d'un objet disposé dans un milieu différent de celui où se trouve l'observateur (fig. 7).*

Suivons les rayons lumineux partant d'un point A, se trouvant au fond d'un cristallisoir rempli d'eau.

Le premier rayon AI se réfracte en I. L'œil de l'observateur placé dans l'air, sur son trajet, voit l'image de A en A′ : cela résulte d'une propriété particulière à l'œil humain.

Le second rayon AI_1, qui fait avec la normale I_1N_1 un angle $\widehat{i_1} > \lambda = 48^o\,30'$, se réfléchit. Le rayon réfléchi I_1I_2 se réfracte en I_2. L'œil de l'observateur voit l'image de A en A_1'. S'il avait été disposé dans l'eau, sur le trajet de I_1I_2, il aurait vu l'image de A en A_1. L'image A_1' n'est, en somme, que celle de A_1.

e) *Lame à faces parallèles (fig. 8).*

Une lame à faces parallèles est un milieu transparent (verre, eau, etc.) *limité par deux plans parallèles.*

Quand un rayon lumineux traverse la lame, le rayon à la sortie, I_1A', est parallèle à sa direction à l'entrée, mais il est déplacé latéralement.

Le déplacement latéral *d* est proportionnel à l'épaisseur de la lame, *e*.

Pour les lames très minces, on néglige ce déplacement latéral et on admet qu'un rayon lumineux traverse la lame sans déviation ni déplacement.

f) *Prisme.*

Les prismes dévient les rayons lumineux. On démontre que, pour les rayons situés dans un plan perpendiculaire à l'arête, l'angle de déviation $\widehat{D} = \widehat{i} + \widehat{r_1} - \widehat{S}$ (voir *fig.* 9).

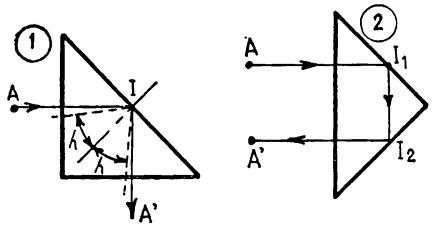


Fig. 6. — Prisme à réflexion totale.

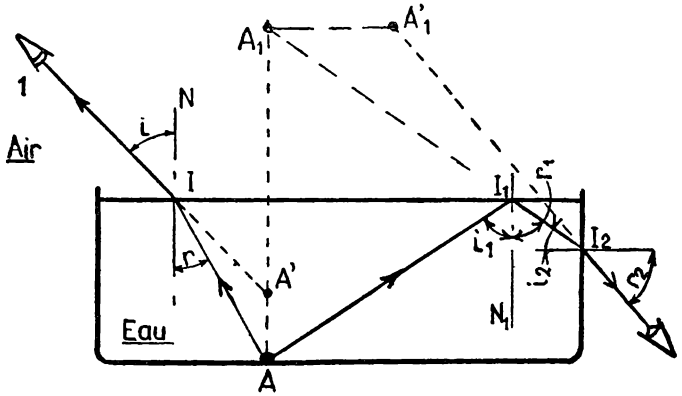


Fig. 7. — Image d'un objet disposé dans un milieu différent de celui où se trouve l'observateur.

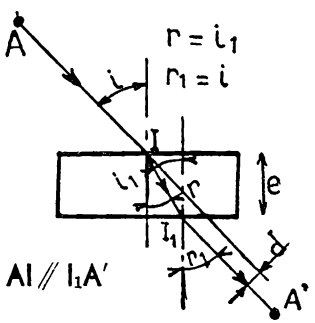


Fig. 8. — Lames à faces parallèles.

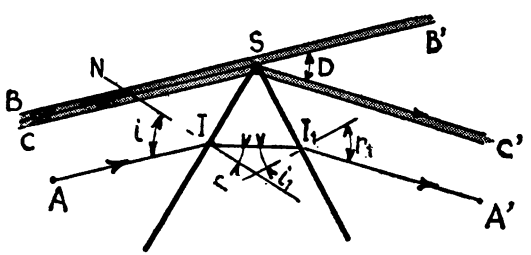


Fig. 9. — Prisme : déviation d'un faisceau lumineux.

Lentilles sphériques minces convergentes.

a) *Axe principal.*

Une lentille sphérique mince est un milieu transparent limité par deux calottes sphériques, de centres C et C_1 (*fig.* 10).

La droite CC_1 est l'**axe principal de la lentille.**

b) *Centre optique.*

Coupons la lentille par un plan contenant CC_1 et, dans ce plan, considérons deux rayons parallèles, C_1I et CI_1 (*fig.* 10). Les tangentes aux arcs de cercle en I et I_1 : IT et IT_1, sont parallèles.

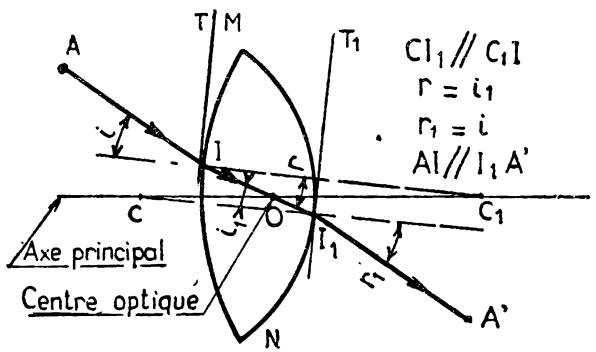


Fig. 10. — Lentille sphérique mince convergente : déviation d'un faisceau lumineux.

Il existe un rayon lumineux AI qui fait, à l'intérieur de la lentille, le trajet II_1. Ce rayon, sans être dévié, est simplement déplacé parallèlement à lui-même. On a : AI parallèle à I_1A'.

La lentille s'est comportée comme une lame à faces parallèles. Comme la lentille est supposée mince, on peut admettre que le rayon AI la traverse sans déviation ni translation.

La droite II_1 coupe l'axe principal en un point O qui occupe, entre C et C_1, une position fixe. O est appelé **centre optique** de la lentille. Si nous traçons deux autres rayons parallèles, IC_1 et I_1C, le rayon lumineux qui admettra, comme trajet intérieur, la nouvelle position de I et I_1, passera aussi par O.

On peut donc admettre que, pour les lentilles minces, les rayons lumineux passant par le centre optique ne subissent ni translation, ni déviation.

c) *Foyer. Plan focal (fig. 11).*

Les rayons parallèles à l'axe principal de la lentille convergent en un point F de cet axe. Si l'on retourne la lentille, le point de convergence des rayons n'a pas changé : sa position ne dépend pas de la position des faces sphériques de la lentille par rapport à la source de lumière.

Le point F est appelé *foyer* de la lentille. Une lentille a deux foyers, F et F', symétriques par rapport au centre optique O.

La distance OF = OF' = f est appelée **distance focale.**

La distance focale est évidemment fonction des rayons de courbure des calottes sphériques qui limitent la lentille. Plus les rayons de courbure augmentent, plus la distance focale augmente. On a, pour une lentille en verre :

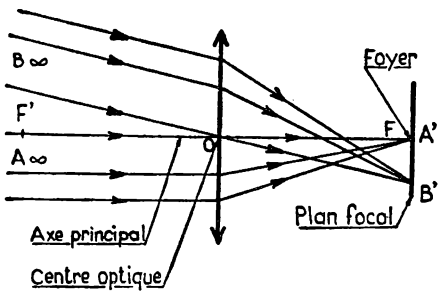


Fig. 11. — Définition du foyer, de la distance focale OF = f et du plan focal.

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1}\right)$$

n : indice de réfraction du verre par rapport à l'air ;
R et R_1 : rayons de courbure.

Le point F et l'image A' d'un point A, situé à l'infini sur l'axe optique, sont confondus.

Les rayons parallèles et obliques par rapport à l'axe optique convergent après avoir traversé la lentille en un point B', image d'un point B situé à l'infini dans la direction des rayons.

Tous les points tels que B' sont situés dans un plan normal à l'axe principal et passant par le foyer F. C'est le **plan focal** de la lentille.

d) *Convergence d'une lentille.*

On appelle convergence *d'une lentille l'inverse de sa distance focale.*

La convergence s'exprime en **dioptries** quand la distance focale s'exprime en mètres.

On a :

$$C_{dioptries} = \frac{1}{f_{mètres}}.$$

Si $f = 0{,}2$ m $\qquad C = \frac{1}{0{,}2} = 5$ dioptries.

e) *Lentilles accolées.*

Un système de lentilles minces accolées fonctionne comme une lentille unique, de convergence égale à la somme des convergences des lentilles. $C = C_1 + C_2$.

Si deux lentilles accolées ont respectivement pour convergence 5 et 4 dioptries, la lentille équivalente a pour convergence :

$$5 + 3 = 8 \text{ dioptries.}$$

Sa distance focale a pour valeur :

$$f = \frac{1}{8} = 0{,}125 \text{ m.}$$

f) *Image des objets.*

Pour déterminer l'image d'un point, on utilisera les propriétés particulières à quelques rayons de lumière issus de ce point :

— Tout rayon qui passe par le centre optique traverse la lentille sans déviation ni déplacement : rayon BOB' (*fig.* 12).

— Tout rayon parallèle à l'axe principal est dévié par la lentille et passe par le foyer : rayon $BC_1F'B'$.

L'intersection de ces deux rayons donne, en B', l'image de B.

— Tout rayon qui passe par le foyer est dévié par la lentille et devient parallèle à l'axe principal : le rayon BFC_2B' passe aussi par le point B', image de B.

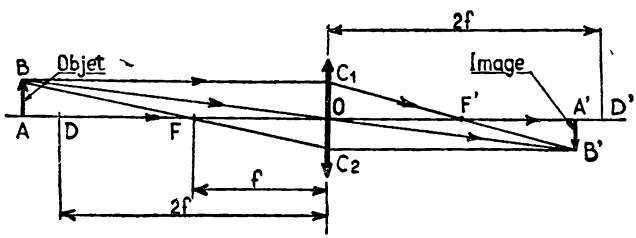


Fig. 12. — Image d'un objet réel situé à une distance du centre optique supérieure à 2 *f*.

L'image d'un vecteur-objet réel AB, perpendiculaire à l'axe principal, est un vecteur renversé A'B', également perpendiculaire à cet axe.

L'image de AB objet réel est une image réelle, car on peut la recueillir sur un écran.

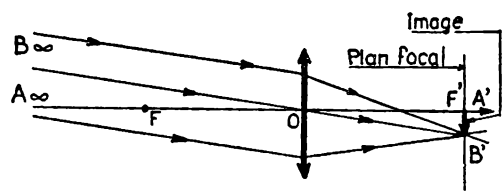


Fig. 13. — Image d'un objet réel situé à l'infini.

L'image d'un objet réel situé à l'infini est réelle renversée et située dans le plan focal de la lentille (*fig.* 13).

L'image d'un objet réel, situé à une distance OA > 2 *f* de la lentille (*fig.* 12), est réelle inversée, plus petite que l'objet et située entre les points F' et D', respectivement éloignés de *f* et 2 *f* du centre optique O.

L'image d'un objet réel, situé à une distance OA = 2 f du centre optique de la lentille (*fig.* 14), est une image réelle inversée, égale à l'objet et située à une distance OA′ = 2 f du centre optique O.

L'image d'un objet réel, situé à une distance OA du centre optique, inférieure à 2 fois la distance focale mais supérieure à la distance focale, est une image réelle inversée, plus grande que l'objet et située à une distance de la lentille supérieure à 2 fois la distance focale (*fig.* 15).

L'image d'un objet réel, situé à une distance OA du centre optique, inférieure à la distance focale f, est une **image virtuelle**, droite et plus grande que l'objet. L'image est virtuelle parce qu'elle ne peut pas être recueillie sur un écran ; seul l'œil d'un observateur peut la voir (*fig.* 16).

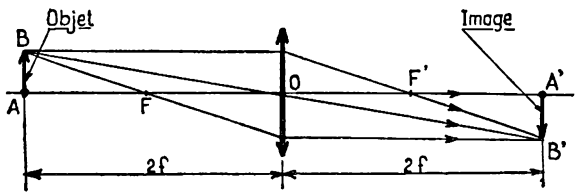


Fig. 14. — Image d'un objet réel situé à une distance du centre optique égale à 2 f.

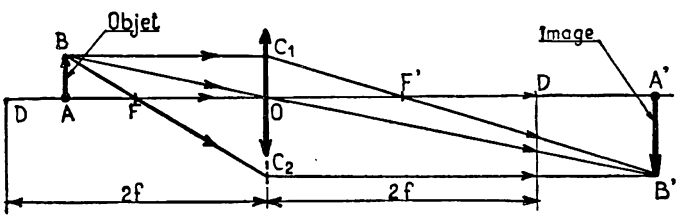


Fig. 15. — Image d'un objet réel situé à une distance du centre optique comprise entre f et $2f$.

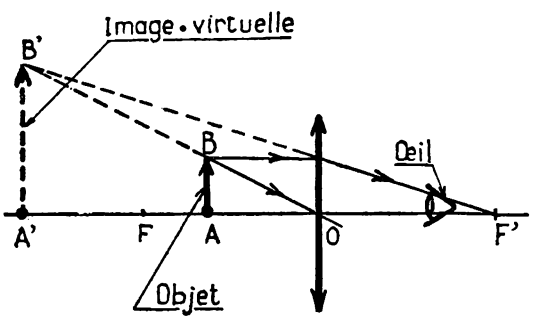


Fig. 16. — Image d'un objet réel situé à une distance du centre optique inférieure à f.

L'œil.

a) *Constitution.*

L'œil est composé d'une série de milieux transparents.

On rencontre successivement, de l'avant à l'arrière (*fig.* 17) :

— la **cornée transparente** ;

— l'**humeur aqueuse**, liquide d'indice de réfraction 4/3 ;

— l'**iris**, écran coloré percé d'une ouverture circulaire, de diamètre variable : la **pupille** ;

— le **cristallin**, lentille biconvexe ;

— l'**humeur vitrée**, liquide d'indice de réfraction 4/3 ;

— la **rétine**, qui est une ramification du **nerf optique.**

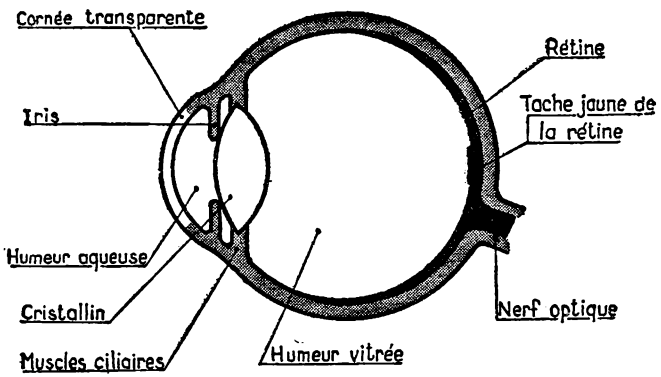


Fig. 17. — Coupe schématique de l'œil.

L'œil est comparable à un appareil photographique dont la rétine est la pellicule sensible et le cristallin la lentille.

Pour qu'un objet se voie nettement, il faut que son image se forme sur la partie la plus sensible de la rétine : la **tache jaune.**

En première approximation, on peut admettre que l'œil est constitué par une lentille dont le foyer, en position de repos, est placé sur la rétine. Ainsi, l'image des objets à l'infini se forme sur la rétine.

Lorsqu'un objet se rapproche de l'œil, la courbure du cristallin change, de façon que l'image de l'objet se forme toujours sur la rétine : c'est le mécanisme de l'**accommodation.** Ce sont les **muscles ciliaires** qui, en se contractant, provoquent cette modification de forme du cristallin.

En accommodant, l'œil voit nettement les objets situés jusqu'à 200 mm environ : c'est la distance minimum de vision distincte.

b) *Perception des détails (fig. 18).*

Pour qu'un objet soit vu nettement, il faut qu'il soit situé à une distance du cristallin au moins égale à la **distance de vision distincte,** mais il doit aussi être vu sous un angle $\widehat{\alpha}$ supérieur à 1 minute. Cette valeur minimum d'angle caractérise l'**acuité visuelle de l'œil** ou son **pouvoir séparateur.**

Si l'acuité visuelle est de 1 minute, soit 3×10^{-4} radian, la hauteur minimum de l'objet placé à 200 mm, distance de vision distincte, est :

$$a = \widehat{\alpha d} = \frac{3}{10^4} \times 200 = 0{,}06 \text{ mm.}$$

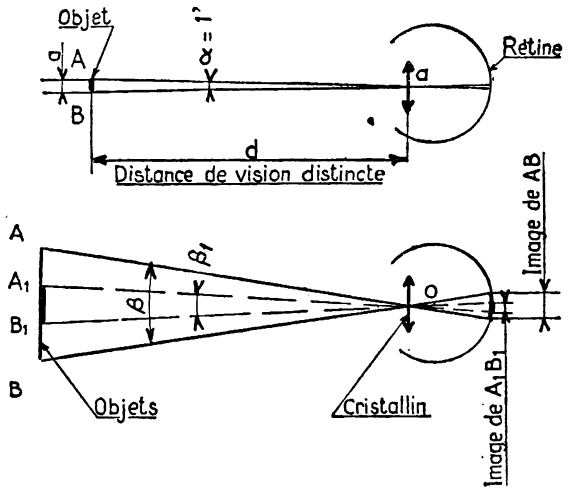


Fig. 18. — Perception des détails : distance de vision distincte, angle minimum de vision distincte.

c) *Grandeur des objets.*

Il est bien évident qu'un objet apparaîtra plus grand qu'un autre si son image sur la rétine est plus grande. C'est donc l'**angle de vision** $\widehat{\beta}$ qui caractérise la grandeur de l'image et, par suite, donne l'impression de grandeur de l'objet (*fig.* 18).

APPLICATION DE L'OPTIQUE A LA MÉTROLOGIE

Les **appareils optiques** ont donné à la métrologie plus de précision et de fidélité : Ils permettent d'obtenir des images d'objets ou portions d'objets qui sont considérablement agrandies. Ces images peuvent être comparées à une graduation ou à un dessin représenté à très grande échelle. L'appréciation chiffrée des erreurs est ainsi possible, à quelques microns près.

La **graduation de règles**, en métal inoxydable, pouvant être actuellement réalisée avec une très grande précision et la lecture des graduations rendue possible, grâce aux appareils optiques, avec un minimum d'erreur, le contrôle des déplacements, jadis réalisé sur les tambours gradués des vis de commande, est maintenant obtenu par lecture directe.

Les appareils optiques permettant d'obtenir des images agrandies des objets sont : la **loupe**, le **microscope** et l'**appareil de projection.**

A. — La loupe

La loupe est une lentille convergente mince, à faible distance focale. L'objet est placé entre le centre optique et le foyer de la lentille (*fig.* 19). L'image virtuelle est droite et plus grande que l'objet.

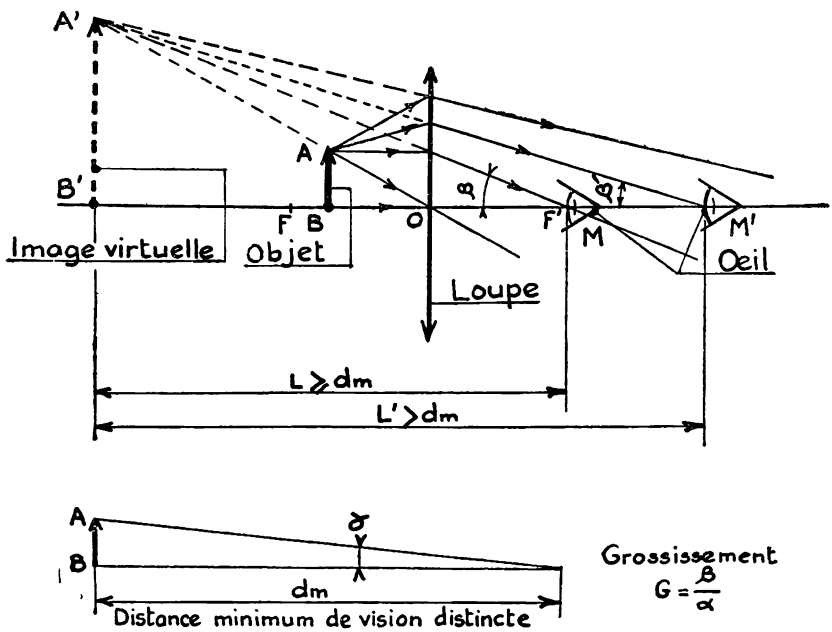


Fig. 19. — La loupe.

Tout se passe comme si, l'objet AB et la lentille n'existant pas, l'observateur regardait directement l'image A'B'. On appelle **diamètre apparent** de l'objet AB, regardé à travers la loupe, l'angle $\widehat{\beta'}$ sous lequel l'observateur aperçoit l'image A'B'.

Plus β' sera grand, plus l'objet apparaîtra grand.

1° Mise au point d'une loupe.

L'image virtuelle doit être mise dans les limites de vision distincte. La distance L' doit être supérieure ou égale à la distance minimum de vision distincte, soit, pour un œil normal, 200 à 250 mm.

Si l'on place l'œil au foyer F' ou dans le plan focal, l'angle $\widehat{\beta}$ est indépendant de la position de l'objet. Il suffit de modifier la position relative de l'objet AB par rapport à la loupe pour obtenir une image A'B' située à une distance L, au moins égale à la *distance minimum* de vision distincte : *dm*.

2° Puissance d'une loupe.

On appelle puissance d'une loupe le rapport $P = \frac{\beta}{AB}$. Il s'exprime en dioptries.

Dans le cas où l'œil est placé au foyer F' et si l'on admet que $\operatorname{tg} \beta \simeq \beta$, on a :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{OF'} \qquad \text{d'où} \qquad P \simeq \frac{\operatorname{tg} \beta}{AB} = \frac{1}{OF'} = \frac{1}{f}.$$

Dans ces formules, β est en radians et AB ainsi que f sont en mètres.

Une loupe dont la distance focale $f = 0{,}05$ m a une puissance égale à :

$$P = \frac{1}{0{,}05} = 20 \text{ dioptries.}$$

3° Grossissement d'une loupe.

Si $\widehat{\alpha}$ est l'angle sous lequel on voit l'objet AB, placé à la distance minimum de vision *dm*, le grossissement de la loupe est égal à : $G = \frac{\beta}{\alpha}$.

Si la distance de l'œil à l'image A'B' est égale à *dm*, on a, en assimilant les angles à leurs tangentes :

$$G = \frac{\beta}{\alpha} \simeq \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\frac{A'B'}{dm}}{\frac{AB}{dm}} = \frac{A'B'}{AB}.$$

Le grossissement est donc égal au rapport des dimensions de l'image et de l'objet.

Le **grossissement commercial** est égal au quart de la puissance : $G_{commercial} = \frac{P}{4}$

Il correspond à l'utilisation suivante : œil au foyer, image A'B' à la distance *dm* de l'œil et $dm = 0{,}25$ m $\left(G = P \times dm = P \times 0{,}25 = \frac{P}{4}\right)$.

Si une loupe a une puissance de 20 dioptries : $G = \frac{20}{4} = 5$.

Les grossissements des loupes varient de 5 à 10.

4° Utilisation des loupes.

Les loupes sont utilisées pour la lecture de graduations fines lorsqu'il est indispensable d'apprécier les fractions de divisions.

Elles sont de précieux auxiliaires des mécaniciens qui exécutent, comme les horlogers, des montages, des démontages et des réglages d'ensembles constitués par des pièces de petites dimensions. La loupe est alors montée à l'extrémité d'un tube permettant de la fixer près de l'œil, le centre optique de l'œil étant disposé au foyer de la lentille. Dans les ateliers de métrologie, l'examen des surfaces usinées peut se faire au moyen de loupes binoculaires.

B. — Les microscopes

Les loupes ne procurent pas un grossissement suffisant et se prêtent mal à la comparaison de la position de l'image d'un objet par rapport à deux axes de coordonnées passant par l'axe optique de l'appareil.

Aussi, on a songé à utiliser le *microscope*, qui permet un fort grossissement ; on le munit d'un *réticule* permettant le contrôle de la position de l'image.

1° Étude de principe du microscope.

Un microscope (*fig.* 20) se compose essentiellement de deux systèmes convergents pouvant être assimilés à deux lentilles minces ayant même axe optique :

a) *L'objectif.*

Il donne une image réelle agrandie. Sa distance focale est faible : $f = 5$ mm semble être un minimum.

b) *L'oculaire.*

Il joue le rôle de loupe pour l'observation de l'image réelle donnée par l'objectif. Sa distance focale est de 20 à 40 mm.

La distance des deux foyers intérieurs, $F' F_1$, est de 160 à 180 mm environ.

L'objet est placé près du foyer de l'objectif et au-delà de ce foyer.

L'œil de l'observateur est placé au foyer F'_1 de l'oculaire. Le réglage de l'appareil doit être tel que l'image virtuelle $A'_1B'_1$ soit située à une distance du centre optique de l'œil au moins égale à la distance minimum de vision distincte *dm* : on a $L \geqslant dm$.

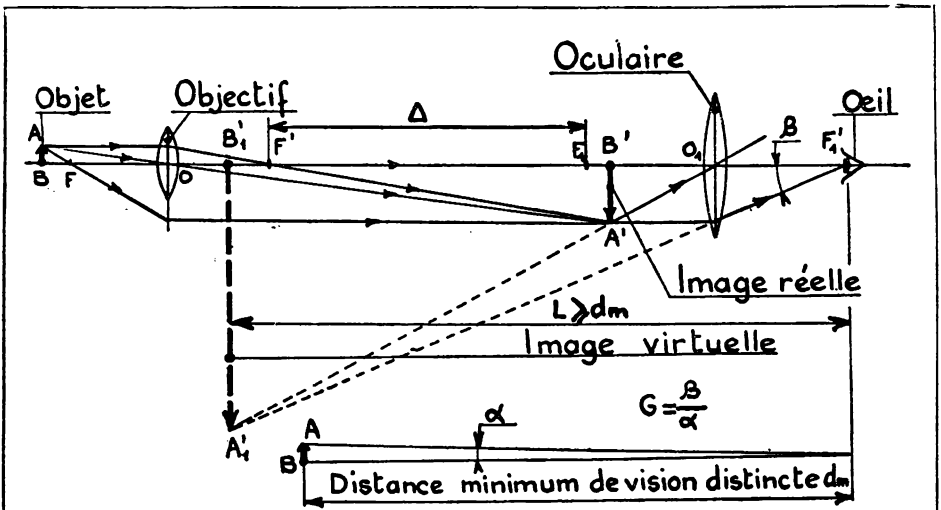


Fig. 20. — Le microscope.

2° Puissance du microscope.

La puissance du microscope est le rapport de l'angle $\widehat{\beta}$, sous lequel on voit l'image $A'_1B'_1$, à la longueur AB de l'objet observé :

$$P = \frac{\beta}{AB}.$$

La puissance s'exprime en dioptries.

La relation précédente peut s'écrire :

$$P = \frac{\beta}{A'B'} \times \frac{A'B'}{AB}.$$

$p = \frac{\beta}{A'B'}$ est la *puissance de l'oculaire,* exprimée en dioptries, et $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$ est l'*agrandissement de l'objectif.*

On a donc :

$$P = p \times \gamma.$$

On démontre que :

$$P \simeq \frac{\Delta}{f_1 \times f_2}$$

f_1 et f_2 étant les *distances focales,* exprimées en mètres, *de l'objectif et de l'oculaire,* et Δ étant la *distance entre foyers,* exprimée en mètres.

Les puissances des microscopes varient de 100 à 3 000 dioptries.

3° Grossissement.

Comme pour la loupe, le grossissement est le rapport de l'angle $\widehat{\beta}$, sous lequel on voit l'image de l'objet à travers l'instrument, à l'angle $\widehat{\alpha}$ sous lequel on voit l'objet à l'œil nu, à la distance minimum de vision distincte :

$$G = \frac{\beta}{\alpha}.$$

On démontre que le grossissement est sensiblement égal au produit de la puissance du microscope par la distance minimum de vision distincte *dm*, exprimée en mètres :

$$G \simeq P \times dm.$$

Si $dm = 0{,}25\ m$ $\qquad G = \frac{P}{4}.$

C'est le **grossissement commercial.**

Si nous supposons un microscope de puissance = 200 dioptries, le grossissement $G = \frac{200}{4} = 50$.

C'est le grossissement le plus couramment employé pour les microscopes utilisés en métrologie.

Si la distance œil-image virtuelle L = *dm*, on aura :

$$G = \frac{A'_1B'_1}{AB} = \frac{\text{image virtuelle}}{\text{objet}}.$$

Ainsi, un objet de 1 mm donnera une image de 50 mm.

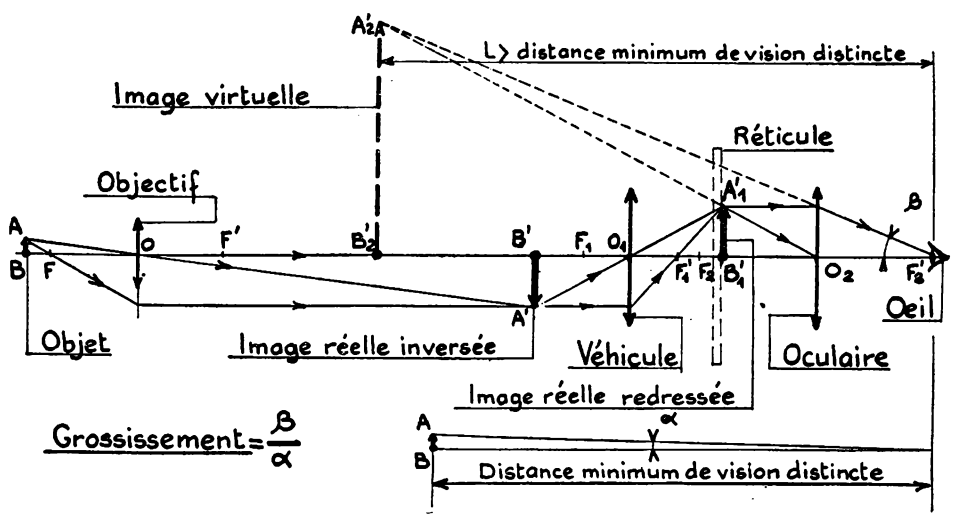


Fig. 21. — Microscope à image **redressée.**

4° Particularités du microscope utilisé en métrologie.

a) *Redressement de l'image (fig. 21).*

Le microscope, tel qu'il a été décrit, donne de l'objet une image inversée. Pour redresser l'image virtuelle, il suffit de disposer, avant l'oculaire, une lentille généralement appelée « **véhicule** ». Elle donne de l'image inversée A′B′ une image droite $A_1'B_1'$ et l'oculaire, faisant office de loupe, donne pour l'observateur l'image virtuelle droite $A_2'B_2'$ de l'objet AB.

Si la distance O_1B' est égale au double de la distance focale de la lentille O_1, l'image $A_1'B_1'$ est égale à A′B′ et le grossissement du microscope n'a pas changé par rapport à celui qu'il aurait sans véhicule.

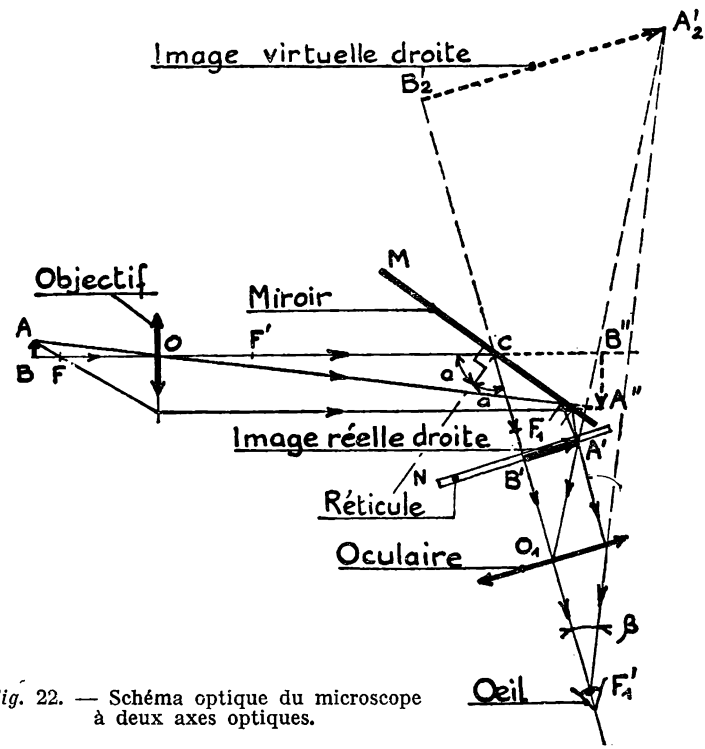


Fig. 22. — Schéma optique du microscope à deux axes optiques.

b) *Microscope à axe optique angulaire.*

Sur le microscope de la *figure* 21, les centres optiques des différentes lentilles (O, O_1, O_2) sont disposés en ligne droite. Mais on peut, pour rendre l'observation plus aisée, dévier le trajet des rayons lumineux. Il suffit de disposer convenablement un miroir (voir *fig.* 22) ou un prisme à réflexion totale. L'oculaire se trouve ainsi déporté et l'appareil peut être plus aisément utilisé (voir, plus loin, *fig.* 24).

Il est à remarquer que le miroir a pour effet de redresser les images. La lentille véhicule n'est plus à utiliser.

c) *Éclairage de l'objet à observer.*

L'éclairage de l'objet est obtenu au moyen de petites lampes électriques comportant un filament enroulé en cylindre et relativement court : ainsi, la source lumineuse peut être considérée comme sensiblement ponctuelle. La puissance des lampes est faible, car il importe d'avoir un dégagement de chaleur minimum : P = 6 W (U = 6 V ; I = 0,5 A). Un faisceau de lumière parallèle peut être obtenu en disposant, devant la lampe, une lentille dont le foyer est sur le filament.

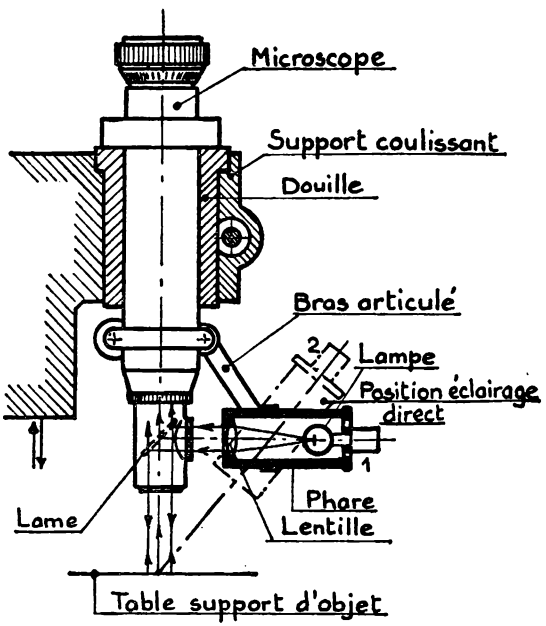


Fig. 23. — Dispositif d'éclairage de l'objet.

La lumière peut être réfléchie sur l'objet au moyen d'une lame transparente mince, à faces parallèles (*fig.* 23). Les rayons lumineux qui se réfléchissent sur l'objet traversent la lame pour aller impressionner l'œil, après avoir traversé le microscope. L'objet peut également être éclairé directement : il suffit d'incliner le phare (position 2, *fig.* 23).

On verra, en étudiant les différentes applications du microscope, les principales solutions adoptées pour l'éclairage des objets à observer.

d) *Grossissement et champ disponible sur l'objet.*

On appelle **champ disponible** sur l'objet la partie de l'objet qui peut être observée. La dimension du champ diminue quand le grossissement augmente.

Pour faire varier le grossissement d'un microscope on change l'objectif. Les objectifs à petite distance focale donnent de forts grossissements. Les grossissements des microscopes utilisés en métrologie et les champs correspondants sont donnés approximativement sur le *tableau ci-dessous* :

Grossissement.....	100	75	50	25	20	10
Diamètre du champ, en mm	2	2,5	3,5	8	10	15

e) *Réticule.*

Le réticule est une lame transparente, disposée perpendiculairement à l'axe optique du microscope, sur laquelle ont été tracés, par procédé photographique, des axes de coordonnées passant par l'axe optique de l'appareil, des graduations, un quadrillage, des lignes inclinées ou des cercles concentriques.

Le réticule est disposé dans le plan de l'image réelle donnée par l'objectif (voir *fig.* 21 et 22). L'image virtuelle du tracé porté sur le réticule se superpose à l'image virtuelle de l'objet. Il est donc possible de situer la position de l'objet par rapport au tracé porté sur le réticule, c'est-à-dire par rapport à l'axe optique du microscope. Il est intéressant de noter que l'objet observé est, le plus souvent, un tracé, la graduation portée sur une règle, un profil...

Le réticule peut occuper une **position fixe** par rapport à l'axe optique.

Il peut aussi être **déplacé dans son plan** qui est, rappelons-le, normal à l'axe optique du microscope.

Le déplacement peut être :

— **Une translation rectiligne** obtenue au moyen d'une vis sur laquelle est monté un tambour gradué qui permet de mesurer le déplacement. L'appareil porte le nom de *microscope micrométrique* (se reporter à la *figure* 25).

— **Deux translations rectilignes perpendiculaires.** Le réticule est alors porté par un ensemble de deux chariots orthogonaux, commandés par vis (se reporter à la *figure* 14 de la *métrologie du plan*).

— **Une rotation autour de l'axe optique du microscope** : *microscope goniométrique* (se reporter à la *figure* 26).

f) *Mise au point des microscopes.*

— **Le réticule occupe,** par rapport à l'objectif, **une position fixe** : il est solidaire du corps du microscope. Pour que l'image du réticule impressionne convenablement la rétine de l'observateur, celui-ci doit **faire varier la position de**

l'oculaire par rapport au réticule. A cet effet, le tube porte-oculaire se visse sur le tube formant le corps du microscope. La mise au point se fait par rotation du tube porte-oculaire.

— **L'image de l'objet**, vu à travers l'objectif, **doit se situer sur le réticule.** L'objet doit donc occuper une position bien précise par rapport à l'objectif. Le réglage suppose le **déplacement**, parallèlement à son axe, **de tout le microscope.** Celui-ci est monté sur un chariot et disposé parallèlement à ses glissières.

Ces réglages sont indiqués sur la *figure* 25, représentant un microscope micrométrique.

5° Les différentes formes données au microscope.

a) *Microscope de pointage.*

Le microscope de pointage est utilisé pour **mettre en position la broche d'une machine par rapport à la pièce.** La *figure* 24 représente un *microscope de pointage pour fraiseuse.*

Il comprend :

— **un microscope angulaire ;**

— **une queue au cône standard.**

L'axe optique de l'objectif est dans le prolongement de l'axe du cône.

Le dispositif d'éclairage comprend une lampe électrique et un miroir à 45°. Ce miroir est percé d'un trou cylindrique permettant aux rayons lumineux réfléchis par l'objet d'atteindre l'objectif, puis l'oculaire. Le champ de ce microscope est d'environ 6 mm.

Le réticule comporte quatre traits orthogonaux deux à deux parallèles et espacés de telle sorte que leur écart représente 0,005 mm sur la pièce. Dans ces conditions, la précision de lecture est de 0,01. Lorsqu'on veut situer la position de l'axe de la fraiseuse par rapport à une face de la pièce, on utilise une **équerre-repère** qui porte, sur une facette polie, un trait extrêmement fin, invisible à l'œil nu et gravé dans le plan de la face verticale.

En manœuvrant les volants de commande des déplacements de la table, on dispose la pièce de façon que le trait de l'équerre se situe entre les traits du réticule : si c'est nécessaire, on fera tourner le corps du microscope pour amener les traits du réticule parallèles à la face de la pièce. L'axe de la broche de la machine se trouve ainsi dans le plan de la face, à 0,005 près. Pour situer la broche en position de travail (alésage ou perçage, par exemple), on déplace la table de la cote portée sur le dessin. Le microscope de pointage permet aussi de régler la position de la broche des machines-outils, à partir de tracés exécutés sur la pièce. Il peut également effectuer ce réglage à partir de surfaces non planes usinées, à condition d'utiliser, pour le pointage, des accessoires conçus dans le même esprit que l'équerre-repère.

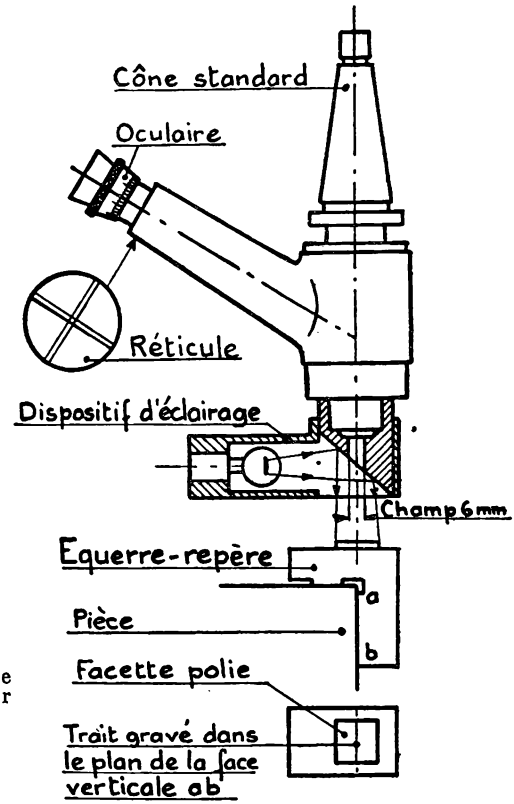


Fig. 24. — Microscope de pointage pour fraiseuse.

b) *Microscope micrométrique.*

Le microscope micrométrique a été conçu pour **mesurer avec précision des écarts de position** (*fig.* 25).

Il est utilisé pour mesurer les déplacements des chariots et tables de machines-outils ou de machines à mesurer, conjointement avec une règle finement graduée en millimètres. La précision garantie est de 0,1 micron pour chaque millimètre.

Lorsque le microscope est monté sur le chariot mobile, la règle est fixe ; lorsqu'il est monté sur une partie fixe de la machine, la règle est fixée sur la table ou sur le chariot mobile.

La règle doit toujours être parfaitement protégée contre la poussière ; elle est exécutée en acier au nickel-chrome, dont le coefficient de dilatation linéaire

doit être sensiblement égal à celui de la fonte constituant les différents éléments de la machine : ainsi, les erreurs de mesure sont réduites au minimum.

Le microscope comporte un réticule qui peut être déplacé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique de l'oculaire, par l'intermédiaire d'un dispositif vis-écrou (voir *fig.* 25).

Un tambour gradué, monté sur la vis et complété parfois par un vernier, permet de contrôler les déplacements du réticule et, par suite, des différences de longueur de l'objet. Les graduations tiennent évidemment compte de l'amplification donnée par l'objectif.

Le réticule porte des traits repères ou une graduation.

Sur la *figure* 25, nous avons représenté un réticule pour microscope de précision. Les graduations comportent chacune deux traits parallèles. Il y a dix graduations ; le passage du repère de la règle de l'une à l'autre correspond à un déplacement de $\frac{1}{10}$ de mm.

Le tambour étant gradué en cent parties égales, on peut, avec ce microscope, lire le micron et apprécier même la fraction de micron.

Principe de la mesure d'un déplacement.

Supposons que l'on souhaite obtenir un déplacement de la table d'une machine-outil de 72,5227. Les différentes manœuvres à réaliser sont les suivantes :

1. On ajuste la position de la table de façon que le trait de la graduation de départ lu sur la règle soit placé exactement entre deux traits parallèles du réticule quand le tambour est à la graduation *zéro*.
   Supposons, par exemple, que le zéro de la règle soit la graduation de départ.
2. Pour réaliser le déplacement de 72,5227, on tourne la vis jusqu'à ce que le tambour gradué indique + 22 μ 7. Le réticule a donc avancé de 22 μ 7dans le sens du déplacement.
3. On déplace le chariot et, en regardant dans le microscope, on amène le trait 72 de la règle exactement entre les traits du réticule correspondant à 5 dixièmes.

Le déplacement total est bien de 72,5 + 0,0227 = 72,5227.

Une règle auxiliaire permet souvent un réglage approché par examen direct de la position d'un index. Les erreurs de lecture sont relativement faibles parce qu'il est facile d'apprécier la symétrie de deux traits (graduation du réticule) par rapport à un autre trait (graduation de la règle).

c) *Microscope goniométrique.*

Le microscope goniométrique est utilisé pour **contrôler et mesurer :**

— des angles plans (tracés, profils découpés, gabarits) ;
— des angles dièdres ;
— les angles que font des surfaces cylindriques avec leurs plans tangents ;
— des filetages de toutes natures.

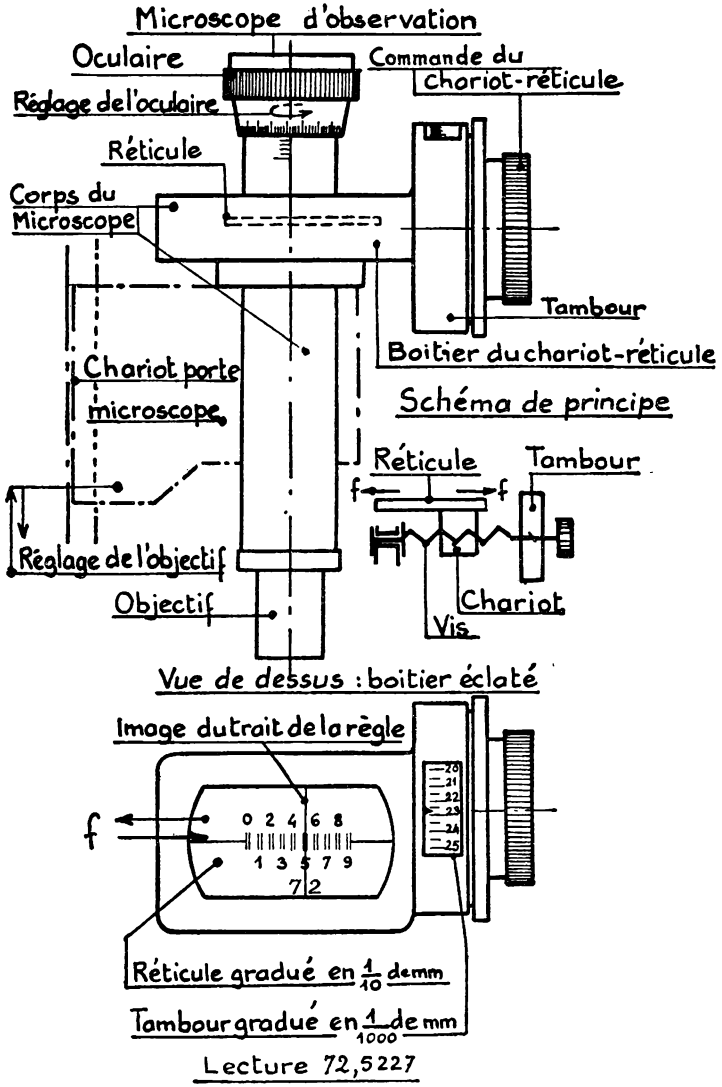


Fig. 25. — Microscope micrométrique.

L'ensemble du microscope comporte deux appareils optiques (*fig.* 26) :

— un **microscope d'observation** ;

— un **microscope auxiliaire de lecture.**

Le microscope d'observation comporte deux réticules de verre superposés, portant chacun un groupe de traits pointillés parallèles.

L'un de ces deux réticules est mobile en rotation autour de l'axe optique de l'oculaire. Sa rotation est commandée par un dispositif comprenant roue et vis sans fin, permettant d'obtenir à volonté un mouvement rapide ou lent. Ce réticule comporte, sur la partie extérieure, un limbe gradué en degrés. Il est visé par **le microscope auxiliaire de lecture** qui permet, grâce à la graduation de son réticule, de lire la minute d'arc.

L'autre réticule est fixe. Pour l'amener en position par rapport à l'objet, il faut faire tourner toute la tête du goniomètre.

L'éclairage des réticules et de la pièce est assuré au moyen d'un phare.

Le microscope est généralement monté sur un chariot parallèle à ses glissières. Le chariot est placé sur un support pouvant être incliné : l'axe du microscope peut ainsi passer de la position verticale à la position horizontale.

La pièce est disposée sur une table mobile sous le microscope.

Réalisation d'une mesure d'angle.

La mise au point du microscope étant faite, on réalise les opérations suivantes :

1. *Les réticules sont placés dans la position* zéro : les axes orthogonaux des deux réticules du microscope d'observation coïncident.
   Le zéro du réticule du microscope auxiliaire coïncide avec la graduation zéro du limbe.
2. *On amène l'image d'un côté de l'angle à mesurer en coïncidence avec un des grands axes orthogonaux* tracés sur le réticule du microscope d'observation : xx', par exemple, qui est superposé à x_1x_1.
3. *On fait tourner le réticule mobile et on déplace la table porte-pièce* jusqu'à ce que l'autre côté de l'angle soit en contact avec l'axe x_1x_1'.
4. *On lit la valeur de l'angle* avec le microscope auxiliaire de lecture : elle est la mesure de l'angle que font xx' et x_1x_1'.

d) *Microscope à palpeur ou microscope comparateur.*

Ce microscope est utilisé **comme un comparateur** à amplification mécanique ou pneumatique.

Il est constitué d'un microscope micrométrique comportant, à une extrémité, un levier palpeur articulé, maintenu en position médiane par deux ressorts (*fig.* 27). A l'extrémité opposée au palpeur, un prisme à réflexion totale est fixé sur le levier ; sur une de ses petites faces, perpendiculaire à l'axe optique du microscope, est tracé très finement un trait parallèle à l'axe d'articulation du levier.

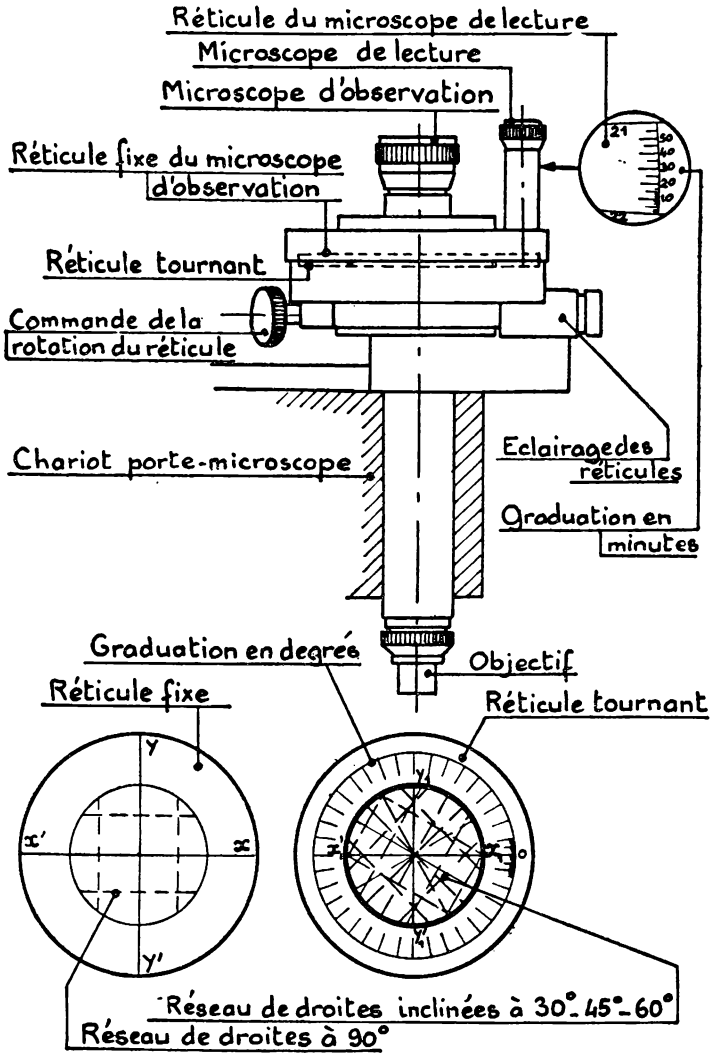


Fig. 26. — Microscope goniométrique.

L'image de ce trait se forme sur le réticule ; il est possible, grâce au dispositif micrométrique, de la placer entre les deux traits rapprochés qui constituent une graduation. Quand le palpeur est sollicité par la pièce, vers la droite ou vers la gauche, le trait se déplace à gauche ou à droite de sa position de repos. Son déplacement, proportionnel à celui du palpeur, est mesuré sur le réticule.

On peut, avec cet appareil, effectuer des mesures de différence de cotes à $\pm$ 0,001 mm.

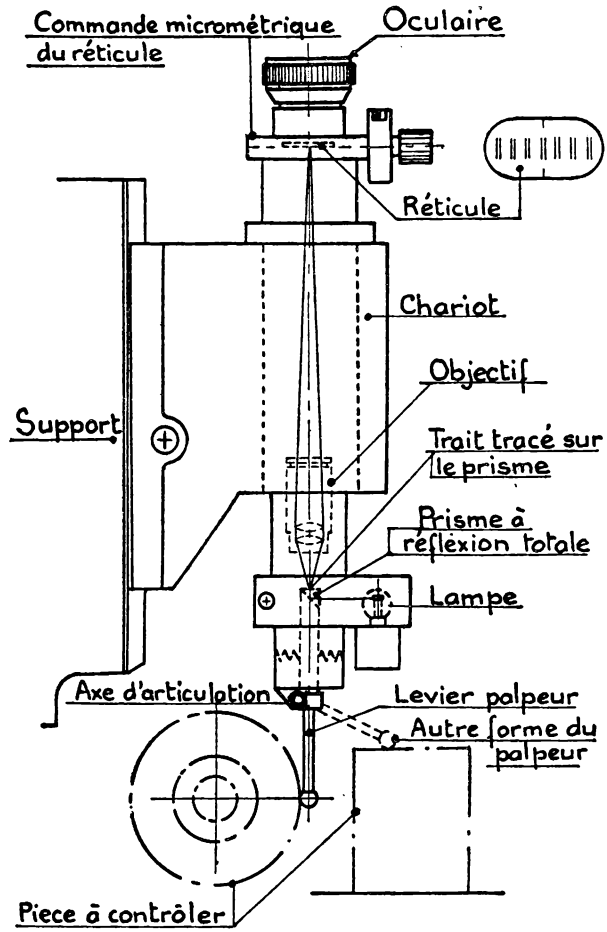


Fig. 27. — Microscope comparateur à palpeur.

C. — Les appareils de projection

Les appareils de métrologie basés sur la projection d'images permettent de comparer à un tracé ou à une graduation :

— l'image agrandie de l'objet à vérifier : ce sont les **projecteurs de profil** ;

— l'image d'un spot lumineux dont la position sur l'écran dépend de la dimension de la pièce mesurée : ce sont les **comparateurs à amplification optique.**

1° Projecteurs de profil.

On projette, sur un écran, l'image agrandie d'un objet éclairé ; cette image est produite par une lentille L_2 appelée objectif (*fig.* 29).

Pour obtenir une image agrandie, il suffit de placer l'objet entre le plan focal et un plan qui lui est parallèle, situé à une distance du centre optique égale au double de la distance focale (voir *fig.* 28 et 29).

Un miroir, disposé sur le trajet des rayons lumineux, permet de placer l'écran dans une position favorable à l'observation.

Les objets à examiner doivent être fortement éclairés.

— On peut éclairer fortement l'objet à examiner et recevoir, sur l'écran, les rayons de lumière renvoyés par l'objet éclairé : c'est la **projection épiscopique** (du grec *epi*, sur, et *skopein*, examiner). La *figure* 28 représente le schéma d'un appareil de projection monté en épiscope.

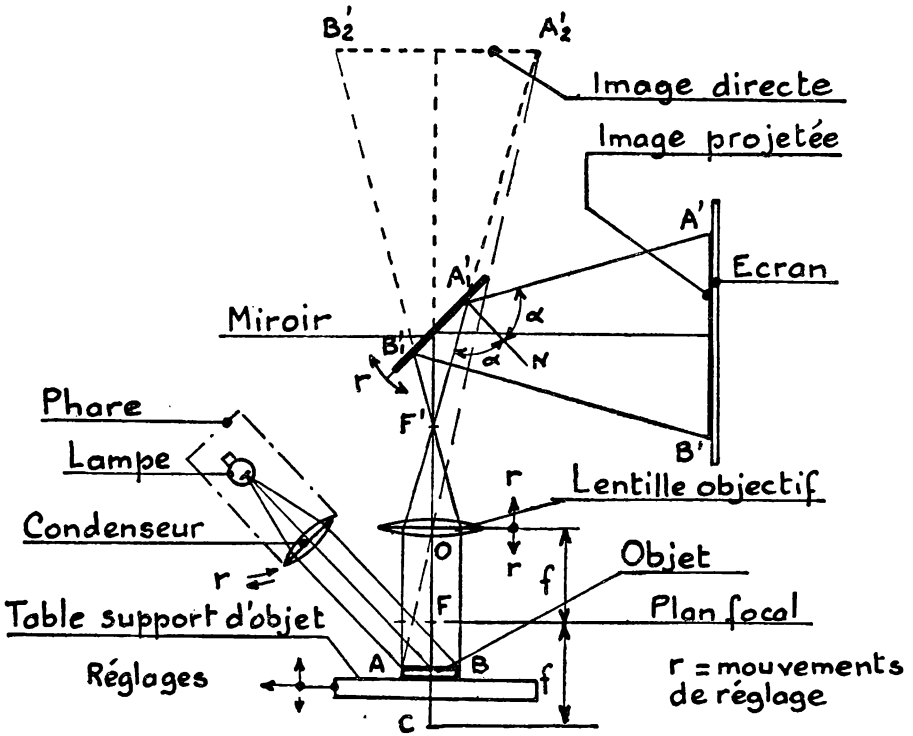


Fig. 28. — Projecteur de profil à projection épiscopique.

Comme l'objet éclairé ne renvoie qu'une faible partie de l'énergie lumineuse reçue, cette projection a un mauvais rendement. Les images sont assez sombres. Le grossissement admis est d'environ 20.

— L'éclairage peut être disposé derrière la pièce. On obtient, sur l'écran, la silhouette sombre de la pièce, entourée d'une zone fortement éclairée directement par la source lumineuse. Le profil de la pièce se distingue très nettement. C'est la **projection diascopique** (du grec *dia*, à travers, et *skopein*, examiner). La *figure* 29 représente le schéma d'un appareil de projection monté en diascope. Le grossissement possible dans ce cas varie de 20 à 50 et parfois même 100.

Sur l'écran de projection, on peut disposer le tracé théorique du profil de la pièce, réalisé sur une feuille de papier calque ou de matière plastique transparente.

Les appareils de projection fonctionnant en diascopie ou en épiscopie sont appelés **projecteurs de profil** : un même appareil peut, le plus souvent, être équipé pour fonctionner en épiscope ou en diascope.

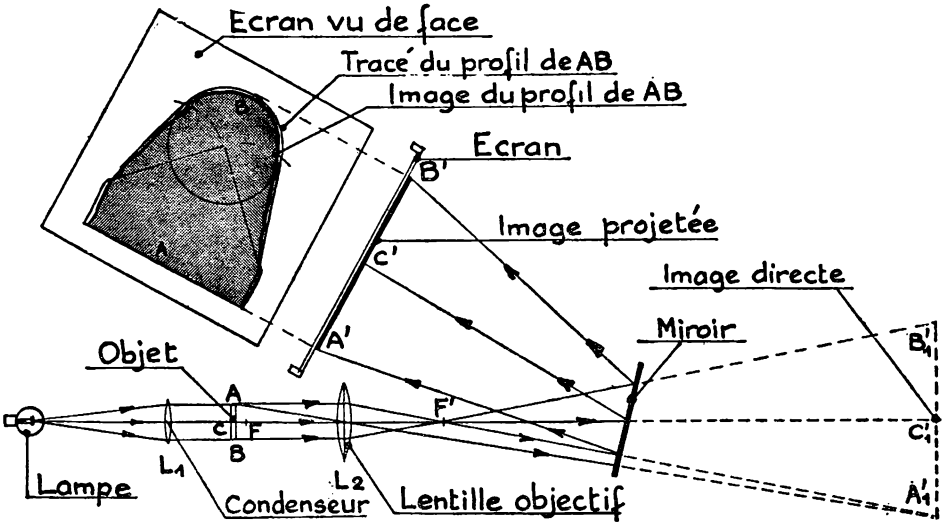


Fig. 29. — Projecteur de profil à projection diascopique.

La *figure* 30 représente un appareil de la *Société genevoise des Instruments de physique*. La table support de pièce, montée comme une table de fraiseuse, peut se déplacer suivant trois directions orthogonales : longitudinale, transversale et verticale. Les déplacements fins sont contrôlés au moyen de comparateurs.

Ce projecteur de profil est équipé pour l'examen des pièces entre pointes. On remarquera, en A, une poupée diviseur, équipée d'un microscope et permettant la lecture de la rotation avec une grande précision. Le phare se trouve en P, l'objectif en O et le miroir en M.

L'écran circulaire est tournant pour faciliter la superposition de l'image et du dessin. Il porte une graduation angulaire. Pour amener l'image sur l'écran, il faut assurer une position relative correcte de l'objet par rapport à l'objectif. Ceci peut être obtenu soit par déplacement de la pièce, soit par déplacement de l'ensemble écran-miroir-objectif.

Utilisation des projecteurs de profil.

Ils sont utilisés pour le contrôle de forme des gabarits, du profil des outils de forme (fraises, outils de taillage, tarauds), des surfaces usinées avec soin, de leur position relative, grâce à la mesure précise du déplacement de la table.

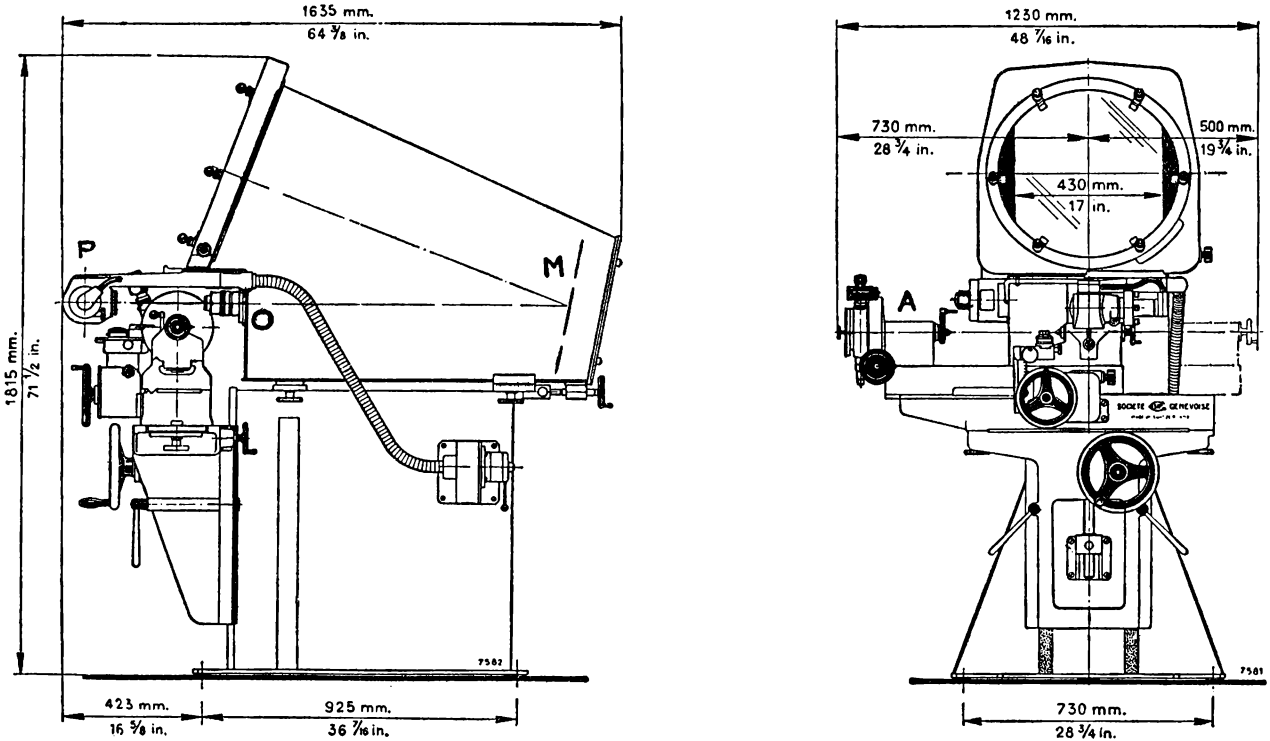


Fig. 30. — Projecteur de profil de la *Société genevoise des Instruments de physique.*

2° Comparateurs à amplification optique.

Nous avons vu qu'il existe des comparateurs comportant un microscope à palpeur.

Il existe des appareils qui utilisent à la fois l'amplification mécanique, obtenue par leviers, et l'amplification optique résultant de la rotation d'un miroir (méthode de Poggendorff). La *figure* 31 représente le schéma du *micro-mesureur* SAGEM.

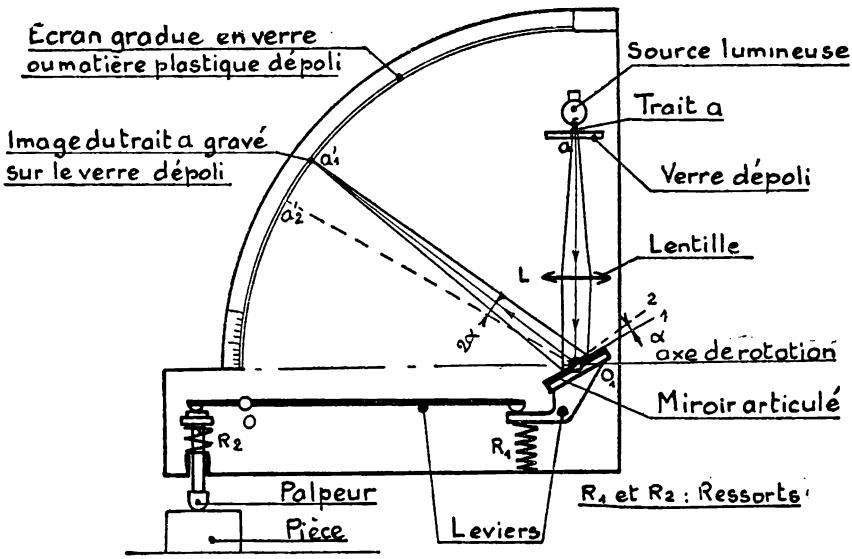


Fig. 31. — Amplificateur optique.

Un palpeur appuie sur la pièce à mesurer avec une pression constante de 2 N/cm². Son déplacement est transmis à un système de leviers qui commande, avec une première amplification mécanique, la rotation d'un miroir plan ou cylindrique. Ce miroir projette, sur une glace cylindrique dépolie et graduée, l'image d'un trait tracé sur une petite plaque de verre.

Quand le miroir fait un angle $\widehat{\alpha}$, l'image du trait se déplace, devant la graduation, d'un angle $\widehat{2\alpha}$. Il y a donc amplification optique et, à un petit déplacement de la touche, correspond un trajet important réalisé, sur le cadran, par l'image du trait.

Une lentille permet d'obtenir, sur l'écran cylindrique, une image plus nette que celle que pourrait donner le miroir seul.

La précision de la mesure est de $\frac{1}{1\,000}$ de mm. L'appareil peut se monter sur un socle et il est ainsi possible de réaliser les mêmes mesures qu'avec un comparateur à amplification mécanique.

Métrologie électrique

A. — Généralités

Nous avons vu qu'il est possible de mesurer une très faible différence de longueur en utilisant des dispositifs d'amplification mécaniques, pneumatiques ou optiques.

L'énergie électrique, en raison des innombrables possibilités d'utilisation qu'elle doit surtout à l'électronique, permet de résoudre avec facilité les problèmes techniques posés par la métrologie dimensionnelle. La réalisation d'une opération de contrôle, avec utilisation de l'électricité, conduit à transformer une très faible variation de longueur en une variation plus importante d'une grandeur électrique facilement mesurable.

Or, les grandeurs électriques dont on peut évaluer l'importance avec rapidité et précision sont l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes d'un récepteur.

1° Utilisation du courant continu.

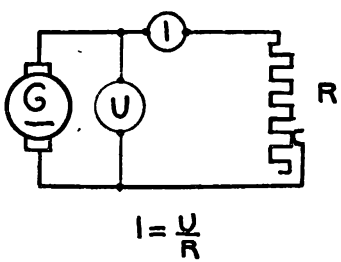


Fig. 1. — Circuit électrique comportant une résistance morte.

En courant continu, l'intensité qui passe dans un circuit dépend de la tension et de la résistance (*fig.* 1). Si la tension est maintenue rigoureusement constante, puisque $I = \frac{U}{R} = \frac{k}{R}$, à toute variation de R correspondra une variation de I qui pourra être lue sur un ampèremètre. Tout dispositif susceptible de transformer une variation de longueur en variation de R, suivant une relation connue, apportera une solution au problème.

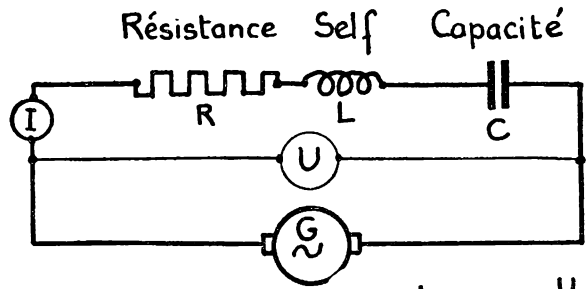
2° Utilisation du courant alternatif.

En courant alternatif, lorsqu'un circuit, comprenant en série une résistance R ohms, de self L henrys et de capacité C farads, est soumis à une tension alternative, de pulsation ω radians par seconde et de tension efficace U volts, l'intensité efficace qui prend naissance a pour valeur :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}.$$

Si U = constante, ω = constante, R = constante, toute variation de L ou de C produira des variations de I qui seront lues sur le cadran d'un ampèremètre (*fig.* 2).

S'il est possible de lier la variation d'une longueur à la variation d'une self ou d'une capacité, on pourra transformer la mesure d'une longueur en une mesure d'intensité électrique.



$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

Fig. 2. — Circuit électrique comportant résistance, self et capacité.

3° Application des phénomènes photo-électriques.

Les phénomènes photo-électriques peuvent également aider à résoudre le problème des mesures de dimensions. On sait que certains métaux, comme le sodium, le potassium, le cæsium, le lithium, émettent des électrons sous l'action de la lumière.

La cellule photo-électrique est un tube à vide contenant une cathode d'un des métaux précédemment cités et une anode sous forme de grille ou d'anneau en tungstène ou nickel (*fig.* 3).

Si un faisceau lumineux éclaire la cathode et qu'une source établit une tension U entre les électrodes, un courant électrique prend naissance ; son intensité I, enregistrée par un microampèremètre, est fonction du flux lumineux qui éclaire la cathode.

Tout dispositif qui permettra de provoquer une variation de flux lumineux à partir d'une variation de longueur permettra de résoudre le problème métrologique qui nous intéresse.

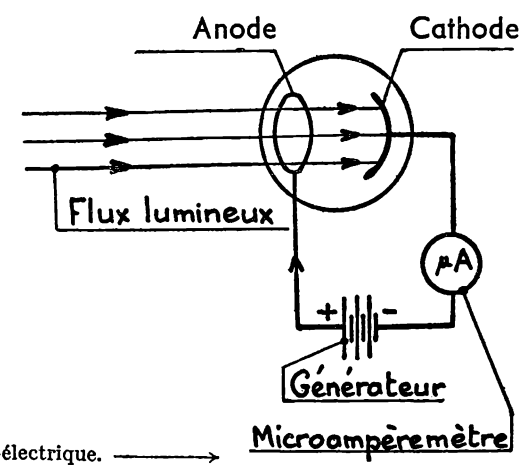


Fig. 3. — Schéma d'une cellule photo-électrique. ——→

B. — Les réalisations pratiques

L'électricité et surtout l'électronique sont tellement riches de possibilités qu'il ne nous est pas possible de décrire tous les appareils qui existent, ni de laisser entrevoir ce qui pourrait être fait dans le domaine de la métrologie dimensionnelle.

Nous nous limiterons à l'étude de quelques appareils, sans jamais décrire avec précision les mécanismes adoptés, car ils varient avec chaque constructeur.

Deux sortes d'appareils sont apparus nécessaires au contrôle des fabrications mécaniques :

1° Des **comparateurs**, permettant de mesurer l'écart existant entre les cotes de la pièce et de l'étalon.

2° Des **appareils de triage**, utilisés pour la vérification des fabrications de série et destinés à renseigner le contrôleur sur la situation de la cote d'une pièce par rapport aux cotes maximum et minimum prévues sur le dessin.

C. — Les comparateurs

Les comparateurs sont des appareils destinés à évaluer des écarts de cotè au voisinage de la cote nominale. Aussi, on a songé tout naturellement à adapter à la mesure des longueurs un appareil électrique dont le fonctionnement est semblable : le *pont de Wheatstone.*

1° Comparateur fonctionnant avec du courant continu.

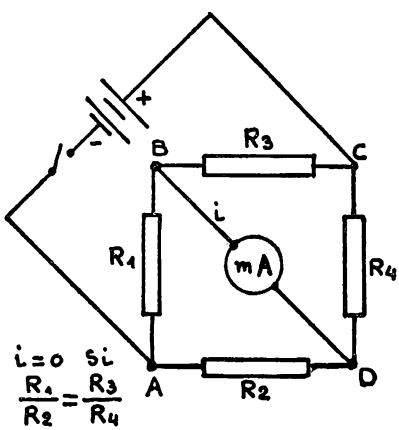


Fig. 4. — Montage des résistances en pont de Wheatstone.

Le pont de Wheatstone est alimenté par du courant continu (*fig.* 4). Quand il est équilibré, c'est-à-dire quand

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \qquad \text{ou} \qquad R_1 = R_2 \times \frac{R_3}{R_4},$$

les points B et D sont au même potentiel. Si nous avons monté, entre ces points, un galvanomètre ou un milliampèremètre, il ne décèlera pas de courant. Si l'on a $R_1 \neq R_2 \times \frac{R_3}{R_4}$, le milliampèremètre indiquera le passage d'un courant dans un sens ou dans l'autre, selon que R_1 sera plus grand ou plus petit que $R_2 \times \frac{R_3}{R_4}$. L'intensité de ce courant est fonction de la nouvelle valeur prise par R_1.

Imaginons que la variation de R_1 soit liée au déplacement d'un palpeur en contact avec la pièce. Il suffit que R_1 soit un rhéostat à point milieu et que son curseur soit commandé par le palpeur.

Le comparateur est ainsi établi (*fig.* 5). On règle l'ensemble des résistances de façon que le milliampèremètre marque zéro quand on a placé, sous le palpeur, la cale étalon à la cote nominale de la pièce.

Le milliampèremètre est gradué en microns et on mesure, en présentant la pièce, les écarts, en plus ou en moins, existant entre la cote de la pièce et celle de la cale.

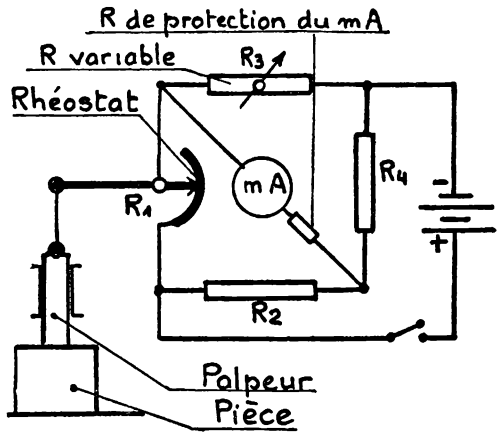


Fig. 5. — Principe du comparateur fondé sur le montage en pont de Wheatstone.

2° Comparateur utilisant le courant alternatif.

a) *Principe.*

On utilise un pont semblable à celui de Wheatstone : le *pont de Sauty*, alimenté par du courant alternatif de haute fréquence (*fig.* 6). Sur les différentes branches, sont montés des condensateurs C_1, C_2 et deux résistances R_1 et R_2.

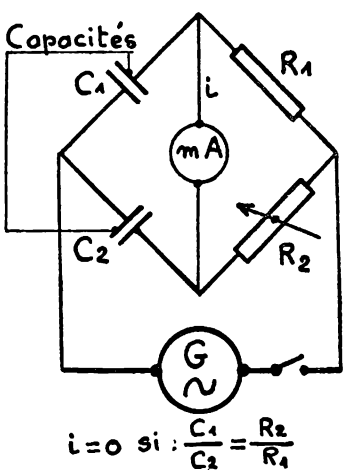


Fig. 6. — Montage en pont de Sauty.

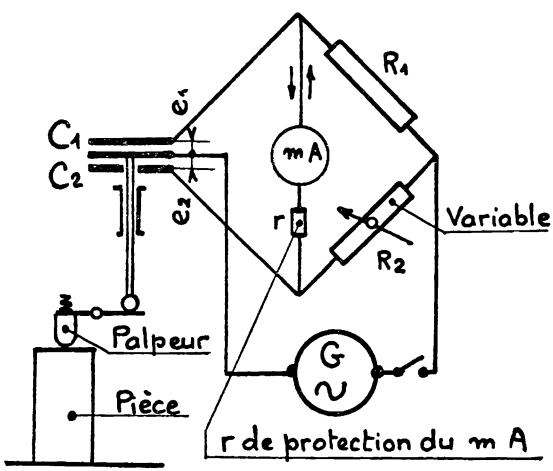


Fig. 7. — Principe du comparateur fondé sur le montage en pont de Sauty.

L'équilibre est obtenu quand on a, entre les éléments du pont, la relation :

$$\frac{\frac{1}{C_2\omega}}{\frac{1}{C_1\omega}} = \frac{R_2}{R_1}, \qquad \text{soit} \qquad \frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Aucun courant ne traverse alors le milliampèremètre.

Les condensateurs C_1 et C_2 peuvent être constitués par deux lames parallèles fixes ; entre elles est placée une lame mobile, commandée par le palpeur (*fig.* 7).

La capacité d'un condensateur est donnée par la relation $C = \frac{k}{e}$, dans laquelle e représente l'écartement entre les lames et k un coefficient qui dépend de la surface des lames et de la qualité de l'isolant entre les lames (ici : l'air).

Donc, quand e diminue, C augmente, et inversement.

Quand le palpeur fait monter la lame mobile :

C_1 augmente, puisque e_1 diminue,

C_2 diminue, puisque e_2 augmente.

Le rapport $\frac{C_1}{C_2}$ augmente. Un courant alternatif est enregistré par le milliampèremètre, puisque l'équilibre du pont est rompu, $\frac{C_1}{C_2}$ étant différent de $\frac{R_2}{R_1}$. Ce courant est fonction du déplacement du palpeur.

b) ***Mesure.***

Pour effectuer une mesure, on règle le comparateur à zéro, en présentant la cale étalon à la cote nominale de la pièce et en faisant varier le rapport $\frac{R_2}{R_1}$. On modifie, pour cela, la valeur de la résistance réglable R_2. On a alors : $\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1}$.

Quand on place la pièce sous le palpeur, si sa cote est plus petite que la cote nominale, le palpeur remonte, le rapport $\frac{C_1}{C_2}$ augmente. Un courant passe dans le milliampèremètre. Comme celui-ci est gradué en microns, on lit, sur son cadran, l'écart de cote existant entre la pièce et la cale. Mais, comme le milliampèremètre reçoit du courant alternatif et dévie toujours dans le même sens, pour connaître le signe de l'écart de cotes on essaye de ramener l'aiguille de l'appareil à zéro, en manœuvrant la résistance variable R_2.

Si l'on doit, par exemple, augmenter R_2 pour obtenir $\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1}$, cela prouve que le rapport $\frac{C_1}{C_2}$ a augmenté et par suite que, le palpeur s'étant soulevé, la pièce a une cote plus petite que la cale étalon.

3° Comparateur utilisant les phénomènes photo-électriques.

Le comparateur comprend une cellule photo-électrique dont le courant débité est réglé par la variation du flux lumineux.

On peut imaginer, pour faire varier l'intensité du flux lumineux, une double grille disposée sur le trajet du faisceau de lumière parallèle. Une grille est fixe, l'autre, solidaire du palpeur, est mobile (*fig.* 8).

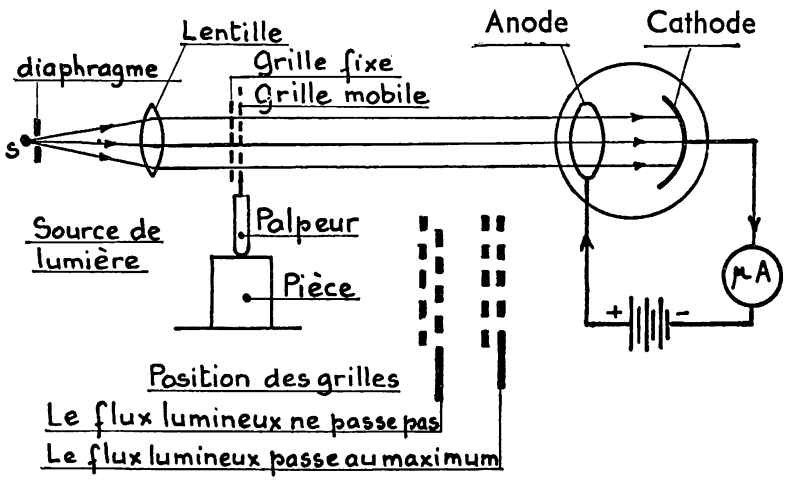


Fig. 8. — Comparateur à cellule photo-électrique.

Les grilles sont constituées par deux plaques de plexiglas sur lesquelles ont été tracés des quadrillages de même dimension dont l'épaisseur des traits est égale à leur intervalle. Quand les traits de la grille mobile sont disposés en face des intervalles transparents de la grille fixe, aucun rayon lumineux ne vient exciter la cathode. Il n'y a pas de courant électrique produit : c'est la position zéro que l'on réserve, pour réglage, à la position du palpeur en contact avec la cale étalon.

Quand on place une pièce, le glissement de la grille mobile se produit, la lumière arrive à traverser les deux grilles, il y a émission de courant électrique. Il est enregistré par le microampèremètre dont la graduation, en microns, correspond aux écarts de cote existant entre la pièce et la cale étalon.

Il est possible de substituer aux grilles la pièce elle-même. Ce sont ses variations de dimensions qui font varier le flux lumineux. Un tel dispositif est utilisé dans certaines fabrications, notamment pour le contrôle de l'épaisseur des produits laminés ou tréfilés

4° Possibilités des comparateurs électriques.

Les comparateurs électriques se prêtent particulièrement bien au contrôle automatique sur machines-outils. Le palpeur peut très bien être en contact avec la pièce pendant son usinage. Les variations d'intensité enregistrées, si faibles soient-elles, peuvent être amplifiées au moyen d'un dispositif électronique. Le courant ainsi amplifié peut actionner un contact auxiliaire, monté sur le circuit du contacteur de commande du moteur des avances, et interrompre l'usinage quand la cote est atteinte.

D. — Appareils de triage pour travaux de série

Comme la fabrication, le contrôle doit être fait en série.

Le comparateur préréglé doit fournir à l'opérateur des renseignements très sommaires sur la cote vérifiée :

— la cote est **comprise entre les tolérances** : la pièce est susceptible d'être **bonne** ;

— la cote est **hors tolérance** : la pièce est **mauvaise.**

Il peut être cependant intéressant, dans le cas où des retouches pourraient rendre la pièce valable et aussi pour contrôler le réglage des machines, de savoir si la pièce est hors tolérance avec excès de matière ou par manque de matière.

Afin de rendre rapides le contrôle et le classement des pièces, le comparateur commande, par un jeu de contacts électriques, des lampes de signalisation. La lampe **verte** indique une pièce bonne, la lampe **rouge** s'allume quand la cote est hors tolérance parce que trop grande, la lampe **orange** révèle une pièce hors tolérance à une cote trop petite.

1° Principaux types de comparateurs adaptés au triage des pièces.

Tous les comparateurs comportent des contacts électriques destinés à commander la signalisation lumineuse. Ces contacts sont actionnés par la pièce à contrôler.

Ils peuvent :

1° Être incorporés dans un appareil spécialement étudié pour l'équipement des montages de vérification. Le comparateur porte le nom de *palpeur coulissant à contacts électriques.*

2° Être adjoints aux comparateurs existants : ce sont les *comparateurs à contact.*

3° Exister dans les appareils de mesure destinés au contrôle des cotes. C'est le cas des *comparateurs Etamic* qui se prêtent particulièrement bien à la vérification des pièces fabriquées en série.

2° Palpeur coulissant à contacts électriques.

Cet appareil a été conçu pour le contrôle avec signalisation lumineuse.

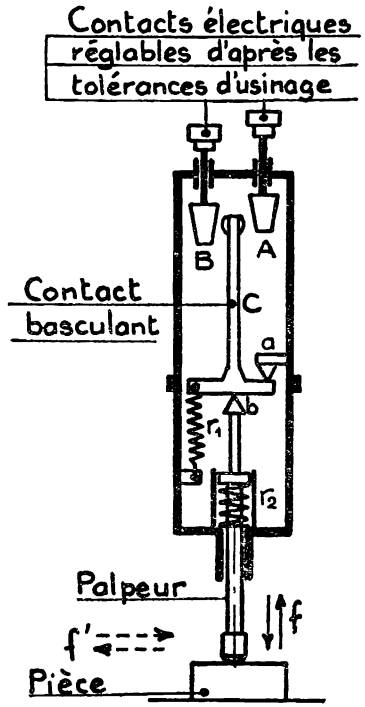


Fig. 9. — Palpeur coulissant à contacts électriques.

a) *Description.*

La *figure* 9 représente un palpeur coulissant. Il comprend :

Un palpeur qui peut être mis en contact avec la pièce ou les combinaisons de cales étalons correspondant aux cotes maximum et minimum prévues. Un ressort r_2 maintient ce palpeur en position levée.

Un contact basculant : ce contact C est maintenu en équilibre grâce à l'action d'un ressort r_1 et de deux couteaux rapprochés, l'un fixe (*a*), l'autre mobile (*b*), placé à l'extrémité du palpeur.

Deux contacts fixes : ces contacts coniques A et B sont réglables en position, suivant les tolérances d'usinage.

b) *Fonctionnement.*

— Au repos, le contact basculant C est appuyé sur B ; la lampe orange s'allume ; cela indique évidemment une cote trop faible.

— Disposons une pièce comprise entre les cotes maxi et mini ; le contact C est entre les contacts A et B ; la lampe verte s'allume.

— Si la cote de la pièce passe hors tolérance, au-delà du maximum, le contact C touche A ; la lampe rouge s'allume.

La tige C doit être, évidemment, légèrement flexible.

Le schéma de principe du branchement électrique est représenté sur la *figure* 10. Entre les bornes d'alimentation en courant alternatif ou continu du circuit de la lampe verte, sont disposés deux contacts, D_1 et E_1, qui sont normalement fermés ; ils s'ouvrent seulement quand les bobines D ou E, placées sur les circuits des lampes rouge et orange, sont alimentées.

Ainsi, la lampe verte s'éteint quand le contact basculant C est soit en A, soit en B.

En réalité, un tel appareil ne pourrait pas fonctionner parce que l'alimentation des lampes nécessite un courant électrique assez considérable. Il se produirait des étincelles importantes quand le contact C quitterait A ou B sans grande vitesse.

On a été conduit à alimenter, avec les circuits comprenant les contacts A, B et C, seulement des relais nécessitant quelques milliampères.

Des amplificateurs électroniques sont nécessaires pour commander des contacteurs disposés en série avec les lampes de signalisation qui sont montées sur le courant à 24, 127 ou 220 volts. C'est ce qui est représenté sur la *figure* 11.

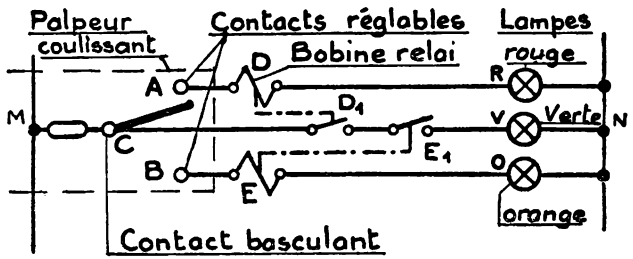


Fig. 10. — Principe du branchement électrique du palpeur coulissant.

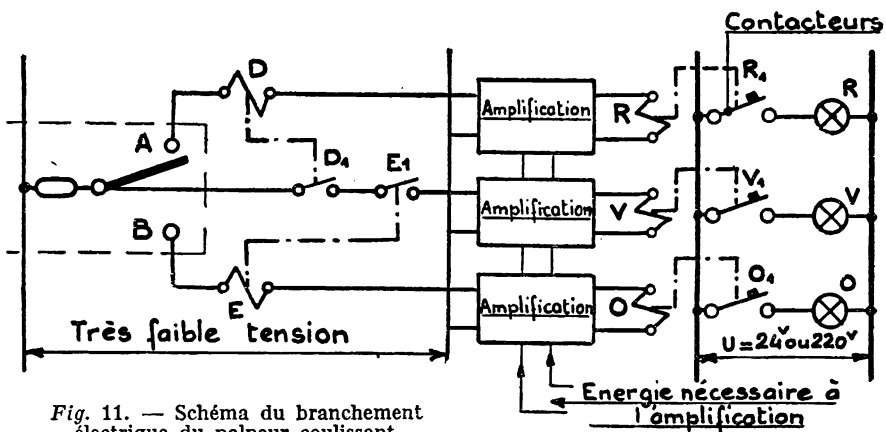


Fig. 11. — Schéma du branchement électrique du palpeur coulissant.

REMARQUE.

Il existe des palpeurs oscillants pour mesure des intérieurs, dont la touche se déplace suivant les flèches *f'* de la *figure* 9.

3° Comparateurs à contacts électriques.

Certains constructeurs ont eu l'idée d'utiliser la tige coulissante des comparateurs à amplification mécanique pour commander des microcontacts qui jouent le même rôle que les contacts A, B et C du palpeur coulissant.

Ces comparateurs doivent, eux aussi, être réunis électriquement à un amplificateur électronique.

Les *figures* 12 et 13 représentent deux adaptations du comparateur à la signalisation lumineuse. Sur le boîtier de l'un des comparateurs (*fig.* 13), on a même monté les lampes de signalisation.

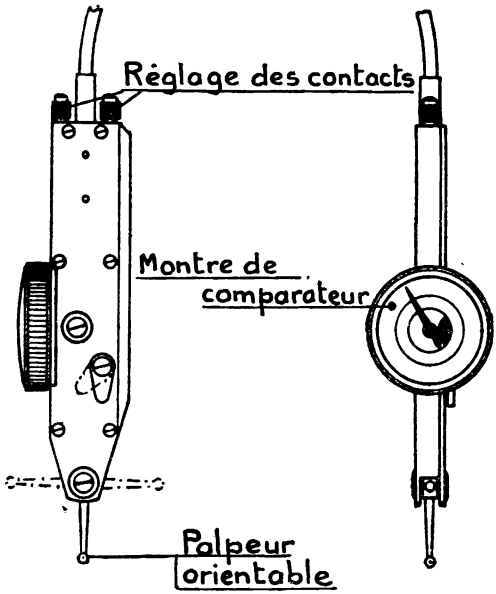


Fig. 12. — Comparateur à palpeur orientable comportant des contacts électriques incorporés.

4° Montage des appareils.

Nous avons vu qu'un ensemble de mesure comprend essentiellement trois parties :

1° **Un ensemble de contacts** actionnés par un palpeur ou par une jauge pneumatique (appareil Etamic ou Solex).

2° **Un système amplificateur** électronique.

3° **Une série de lampes** de signalisation.

La première partie constitue, à elle seule, un appareil (palpeur coulissant, comparateur à contacts, jauge) qui doit être mis en contact avec la pièce. Aussi, cet ensemble est disposé, ainsi que la pièce à contrôler, sur un montage spécialement étudié.

Les deuxième et troisième parties sont, le plus souvent, groupées dans un coffret de signalisation, conçu pour être accolé à d'autres coffrets semblables.

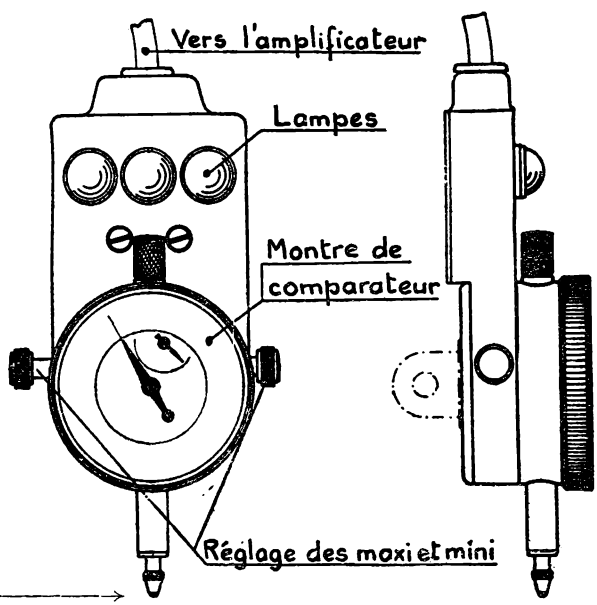
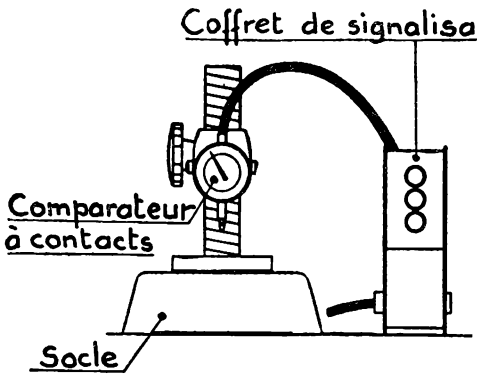


Fig. 13. — Comparateur à cadran comportant la signalisation électrique incorporée : contacts et lampes. ——→



Ainsi, l'ensemble de mesure comporte deux groupes d'appareils reliés électriquement (voir *fig.* 14).

Fig. 14. — Ensemble comparateur ← et coffret amplificateur de signalisation.

5° Association des appareils pour le contrôle de série.

a) *On vérifie séparément toutes les cotes.*

Pour le contrôle de série, on peut disposer côte à côte des ensembles comportant le palpeur coulissant ou comparateur à contacts électriques et le coffret de signalisation (voir *fig.* 15).

Les appareils sont réglés pour le contrôle des différentes cotes des pièces. La pièce se déplace sous chaque palpeur.

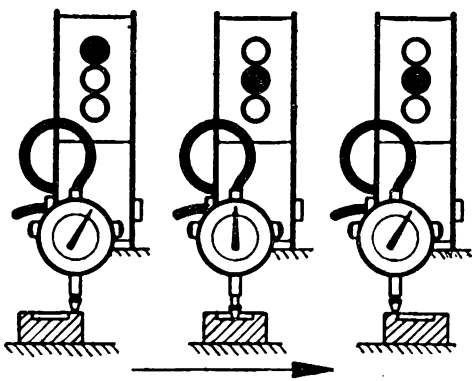


Fig. 15. — Contrôle en série utilisant plusieurs ensembles de signalisation.

b) *Le contrôle de toutes les cotes peut être fait en même temps.*

Les palpeurs coulissants (*fig.* 16), comparateurs à contacts électriques, jauges pneumatiques, sont disposés en bonne place sur un montage. La pièce peut être facilement installée et rapidement retirée.

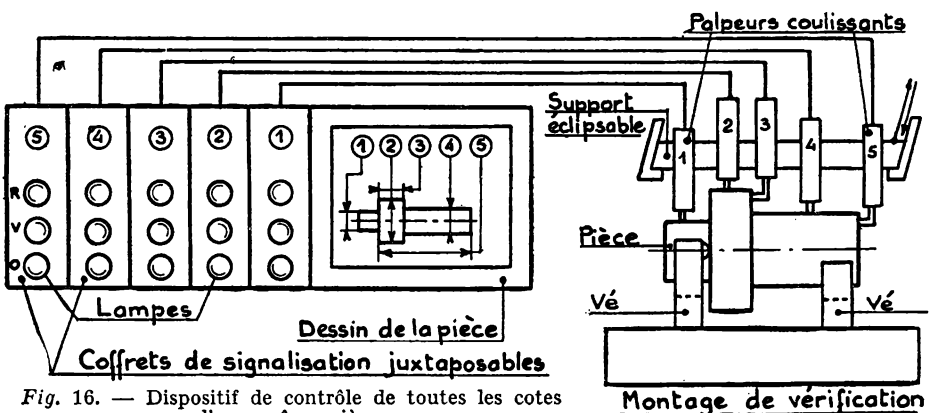


Fig. 16. — Dispositif de contrôle de toutes les cotes d'une même pièce.

Les palpeurs sont reliés électriquement à des coffrets de signalisation fixés les uns aux autres. Sur la façade du boîtier, on peut placer le dessin de la pièce, sur lequel les différentes cotes sont repérées, aux mêmes chiffres que les coffrets et les palpeurs correspondants.

Ainsi, l'opérateur est renseigné sur la cote qui a entraîné la mise au rebut de la pièce.

6° Triage automatique des pièces usinées.

Il est possible d'obtenir le classement automatique des pièces contrôlées, en adaptant, à l'appareil à contact, un circuit constitué par trois goulottes qui correspondent aux pièces bonnes, mauvaises par excès de matière, ou mauvaises par manque de matière (*fig.* 17).

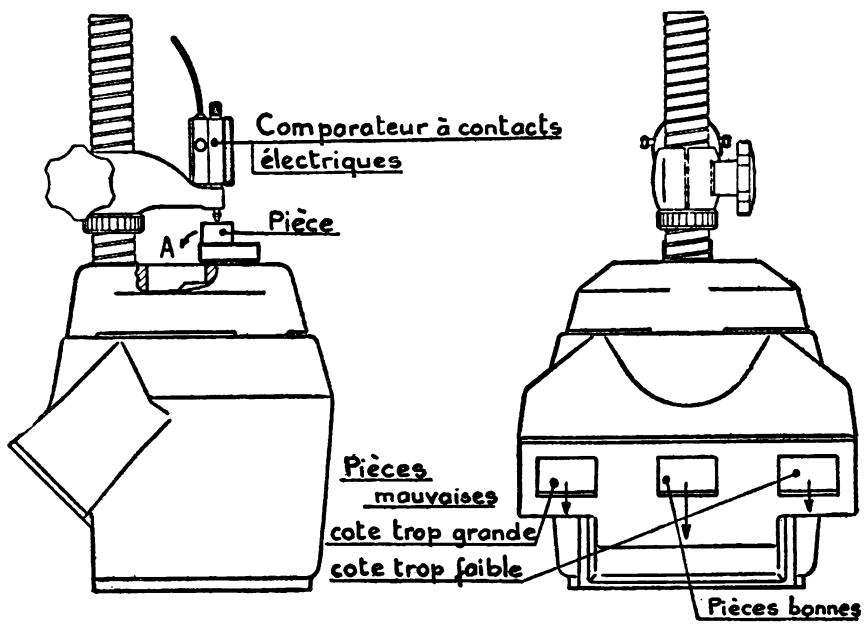


Fig. 17. — Appareil permettant le classement automatique des pièces.

Les pièces passées sous le comparateur sont introduites dans l'orifice A. Un volet, actionné par le système comparateur-amplificateur, oriente les pièces selon leur qualité. Il est aisé d'imaginer que le volet puisse être commandé par des électro-aimants disposés sur le circuit électrique, en parallèle avec chaque lampe.

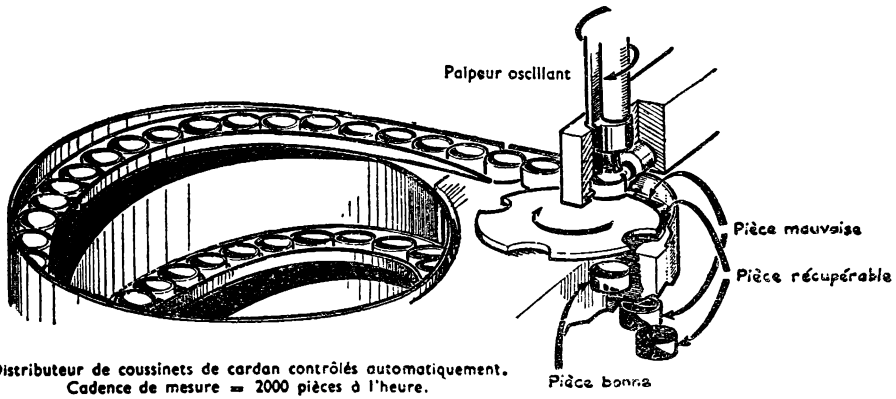
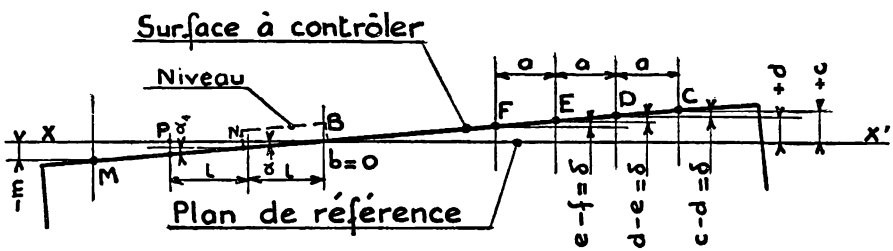


Fig. 18.

Enfin, à titre de documentation, nous donnons le schéma d'un *distributeur de coussinets* (*fig.* 18) contrôlés automatiquement à la cadence de 2 000 pièces à l'heure, au moyen d'un palpeur oscillant animé d'un mouvement hélicoïdal.

La pièce est orientée par le distributeur, en fonction des informations recueillies par le palpeur. Ce schéma est tiré d'une notice de la *Précision mécanique.*

◇


Surface à contrôler
Niveau
Plan de référence
X
X'
M
P
N
B
F
E
D
C
b=0
a
a
a
l
δ l
δ
δ
δ

Métrologie du plan

CONTROLE DES SURFACES PLANES

Les surfaces planes que l'on doit réaliser avec précision sont des surfaces de contact des pièces entre elles, dans le but d'assurer une étanchéité, un guidage de mouvement (tables et glissières des machines), une mise en position relative précise (marbre, semelles des éléments fixes des machines).

La réalisation suppose une opération de finition qui peut être une rectification, un grattage ou un rodage.

Il importe de connaître la position et la valeur des erreurs correspondant à un nombre, aussi grand que possible, de points de la surface contrôlée.

Ce contrôle doit être fait :

a) Après les opérations d'usinage en demi-finition. On peut ainsi mieux organiser la finition, surtout s'il s'agit de grattage.

b) En cours d'opération de finition, pour renseigner l'opérateur de l'état d'avancement du travail.

c) Après finition, pour s'assurer de la qualité de l'usinage.

d) Après montage, pour s'assurer que les déformations dues aux actions de contact ne compromettront pas le fonctionnement de la machine. Ce contrôle peut conduire à des modifications de calage, notamment en ce qui concerne les machines-outils.

Nous avons étudié, en classe de troisième, les méthodes de contrôle de surfaces planes d'assez faible étendue. L'étude qui va suivre intéresse principalement la vérification des surfaces planes de grandes dimensions.

A. — Principe du contrôle des surfaces planes de grandes dimensions

1° Méthode générale.

On choisit un plan de référence idéal passant par un point B quelconque de la surface à contrôler (*fig.* 1).

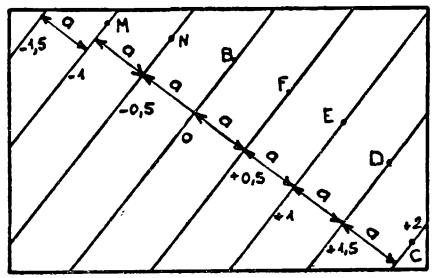
On mesure les distances des différents points de la surface au plan de référence.

Comme on considère, le plus souvent, le plan de référence horizontal, ces distances portent, comme en géométrie descriptive, le nom de *cotes*. Tous les points C, D, E, F..., situés au-dessus de B, ont des *cotes positives* : $+ c, + d, + e, + f$... Les autres, tels que M, ont des *cotes négatives*.

La surface à contrôler est un plan parfait si, les points C, D, E, F étant espacés d'une même longueur a, les différences de cotes entre deux points sont égales : $\delta = e - f = d - e = c - d$. En effet, les triangles rectangles ayant FE, ED et DC pour hypoténuses sont égaux, car ils ont un côté de l'angle droit et un angle aigu ($\widehat{F} = \widehat{E} = \widehat{D}$) égaux.

L'intersection de la surface à contrôler par des plans parallèles au plan de référence et passant par C, D, E, F..., détermine des droites parallèles équidistantes : ces droites sont les *lignes de niveau* de la surface (voir *fig.* 2).

La connaissance des lignes de niveau est intéressante, car elle permet de situer : d'une part, les zones qu'il convient d'usiner et, d'autre part, la forme générale des défauts pouvant être corrigés par calage.



Disposition des lignes de niveau d'une surface plane

Fig. 2.

2° Établissement de la topographie des surfaces à contrôler.

Pour représenter les lignes de niveau, on trace au crayon, sur la surface, un quadrillage qui tient compte à la fois de la forme de la surface et de l'appareil de mesure employé.

a) *Utilisation du niveau.*

Quand on se sert du **niveau à bulle**, le plan de référence est **horizontal.**

Le niveau permettant de mesurer la pente du plan de sa semelle par rapport au plan horizontal, si on le place entre B et N, on mesure tg α et la cote de N a pour valeur : $n = l \text{ tg } \alpha$ (*fig.* 1).

Si on place le niveau entre N et P, on lit tg α_1 et la cote de P a pour valeur : $p = n + l \text{ tg } \alpha_1$.

Cette relation montre que les erreurs s'additionnent. Ainsi, l'erreur de détermination de p est la somme de l'erreur commise sur n et des erreurs de mesure de l et de tg α_1.

Le quadrillage doit avoir, comme distance entre traits, la longueur entre patins existant sous la semelle du niveau.

b) *Emploi de la règle.*

Quand on se sert d'une **règle**, le plan de référence est **défini par trois points** pris arbitrairement sur la pièce.

En disposant la règle parallèlement à la droite qui joint deux points de ce plan, on peut mesurer les différences de cotes des points situés sous la règle.

Nous avons vu (tome 1) que l'on peut utiliser, pour effectuer cette mesure, un petit chariot sur lequel est fixé un comparateur (*fig.* 3).

On peut aussi placer un amplificateur pneumatique ou électrique à la place du comparateur à amplification mécanique.

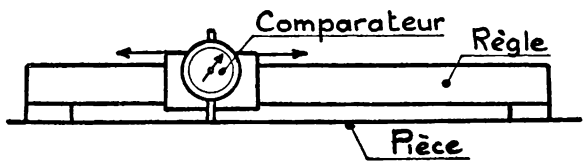


Fig. 3. — Règle avec chariot porte-comparateur.

B. — Vérification du plan au niveau

1° Étude du niveau.

Le niveau bien construit est un appareil de précision.

Un niveau comprend une fiole qui est un tube de verre rodé intérieurement avec beaucoup de soin. Ce tube est hermétiquement bouché à ses extrémités. A l'intérieur, on a mis un liquide très mobile : de l'éther ou de l'alcool. Le liquide ne remplissant pas toute la fiole, il existe une partie libre de liquide et remplie d'air, ou de vapeur d'éther ou d'alcool si l'on peut arriver à faire le vide au-dessus du liquide avant de boucher.

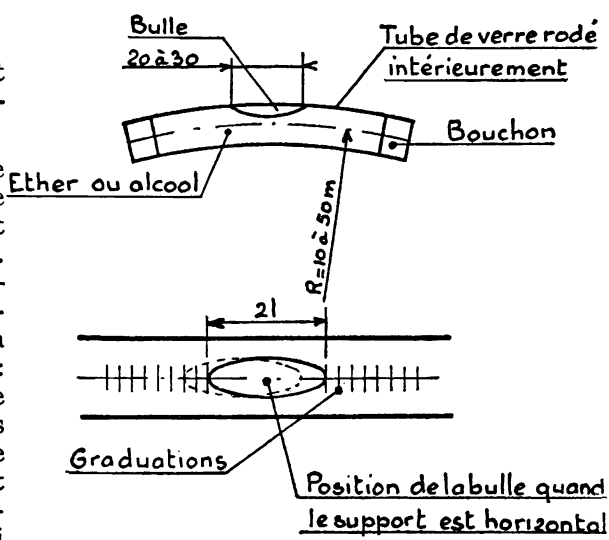


Fig. 4. — Caractéristiques du niveau à bulle.

La fiole a la forme d'une portion de tore. Le rayon de ce tore est très grand : 10 à 50 mètres (*fig.* 4).

Les fioles sont placées dans des montures dont la semelle parfaitement plane

comporte, le plus souvent, une rainure dont le profil est un angle droit. On peut ainsi utiliser le niveau pour contrôler l'horizontalité de l'axe d'une surface cylindrique.

La monture comporte parfois un bras articulé, destiné à faciliter les mesures (*fig.* 5). Les niveaux ont aussi la forme d'un cadre. Les deux surfaces usinées, qui sont orthogonales, permettent ainsi la vérification de la verticalité et de l'horizontalité des surfaces planes et cylindriques (*fig.* 6).

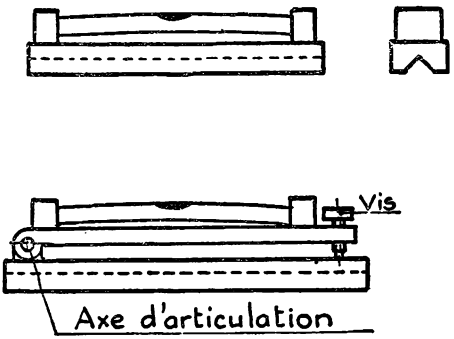


Fig. 5. — Forme générale des niveaux.

2° Signification du déplacement de la bulle.

L'épure du déplacement de la bulle d'un niveau a été représentée sur la *figure* 7. En trait fort on a dessiné la fiole du niveau quand sa semelle est horizontale.

La bulle est à la partie la plus élevée du liquide. On incline le niveau d'un angle $\widehat{\alpha}$, en le faisant tourner, par exemple, autour du centre O : sa nouvelle position est représentée en pointillés.

Si l'on prend pour référence le centre O, la bulle n'a pas changé de place. Elle est toujours située à la partie la plus haute du liquide et sa longueur ne s'est pas modifiée. Mais, par rapport au tube, tout se passe comme si l'axe de la bulle s'était déplacé de A_1, milieu du tube, en A_2. Les parties extrêmes se sont évidemment déplacées d'un arc de même mesure.

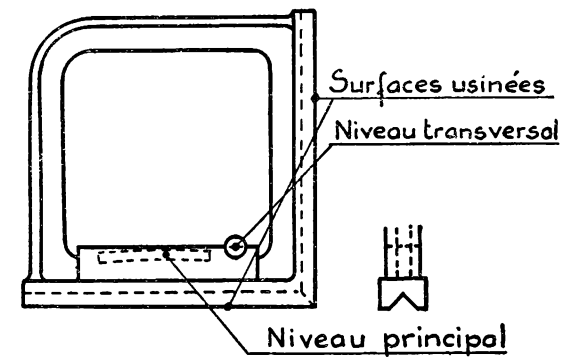


Fig. 6. — Niveau à cadre.

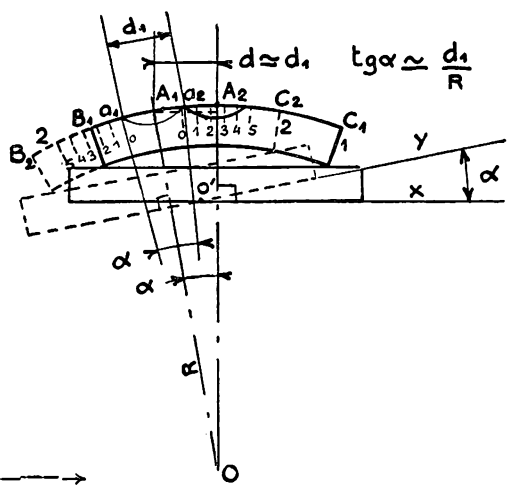


Fig. 7. — Épure du déplacement de la bulle et signification de la graduation.

La bulle dont les extrémités étaient, au départ, tangentes aux graduations zéro, a pris, par rapport au tube, une position telle que l'extrémité de droite s'est arrêtée, par exemple, devant la division 4,5. L'angle $\widehat{\alpha}$, caractérisant le déplacement de la bulle, est mesuré par l'arc valant 4,5 divisions. Cet angle, qui est égal à l'angle $\widehat{A_2OA_1}$, est égal à l'angle du dièdre qui a pour faces les deux positions de la semelle du niveau. On a : $\widehat{A_2OA_1} = \widehat{XO'Y}$, puisque ces angles ont leurs côtés perpendiculaires et de même sens.

3° Caractéristiques des niveaux.

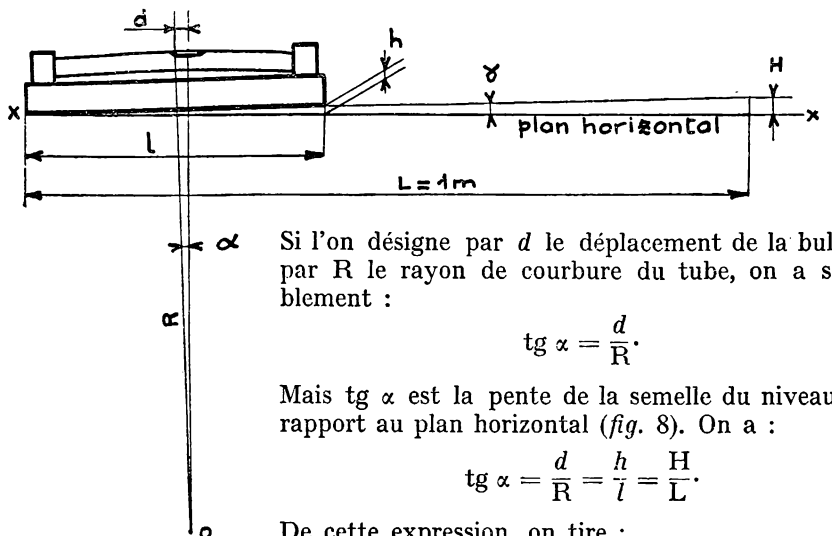


Fig. 8.— Inclinaison du niveau: rapport d'amplification $a = \frac{R}{l}$.

Si l'on désigne par d le déplacement de la bulle et par R le rayon de courbure du tube, on a sensiblement :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{R}.$$

Mais tg α est la pente de la semelle du niveau par rapport au plan horizontal (*fig.* 8). On a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{R} = \frac{h}{l} = \frac{H}{L}.$$

De cette expression, on tire :

$$\frac{d}{h} = \frac{R}{l}.$$

a) *Rapport d'amplification.*

Le rapport d'amplification du niveau est égal au quotient de la longueur du déplacement d de la bulle par la hauteur h de levée de la semelle. Il a pour valeur :

$$a = \frac{d}{h} = \frac{R}{l}.$$

Si R = 50 m et l = 0,25 m, $\frac{R}{l} = \frac{50}{0{,}25} = 200$.

b) *Sensibilité.*

La sensibilité du niveau est la valeur de tg α donnant un déplacement de la bulle égal à une division. La sensibilité a donc pour expression :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{R}$$

quand on donne à d la longueur de 1 division.

Si $d = 2$ mm et R $= 50$ m, on a :

$$\text{tg } \alpha = \frac{2}{50\,000} = 4 \times 10^{-5}.$$

La *pente par mètre* représentée par cette valeur est la hauteur H, quand L $= 1$ m $= 10^3$ mm.

On a : $$H = L \text{ tg } \alpha = L \times \frac{d}{R} = 10^3 \times \frac{d}{R}$$

H est évidemment exprimée en mm, d et R avec la même unité.

Dans l'exemple précédent, on a :

$$H = 10^3 \times 4 \times 10^{-5} = 4 \times 10^2 = 0{,}04 \text{ mm},$$

puisque tg $\alpha = 4 \times 10^{-5}$.

On voit que la sensibilité et la pente par mètre, correspondant au déplacement de la bulle égal à 1 division, sont inversement proportionnelles au rayon de courbure R de la fiole. Plus R augmente, plus le niveau est sensible et susceptible de détecter de faibles pentes.

Avec le niveau précédent, on a vu qu'à un déplacement de bulle de 1 division, soit 2 mm, correspond une pente de 0,04 par mètre. Si le niveau a une longueur $l = 250$ mm, la hauteur pour une division est :

$$h = l \times \text{tg } \alpha = 250 \times 4 \times 10^{-5} = 0{,}01.$$

Comme on peut aisément apprécier le $\frac{1}{10}$ de division, il est donc possible de déceler, avec ce niveau, des défauts de $0{,}01 \times \frac{1}{10} = 0{,}001$, soit 1 micron.

Ce niveau de précision, s'il possède 10 divisions de chaque côté du zéro, pourra détecter des défauts dont la somme aura pour valeur :

$$\pm 10 \times 0{,}01 = \pm 0{,}1.$$

Si l'on avait considéré un niveau ayant un rayon de courbure moitié plus faible, R $= 25$ m, toutes les performances auraient été doublées :

sensibilité pour une division : tg $\alpha = 8 \times 10^{-5}$
$H = 0{,}08$
$h = 0{,}02$.

Ce niveau est évidemment moins précis que le précédent.

La fiole des niveaux de qualité a un grand rayon de courbure.

c) *Niveau de haute précision à lecteur optique.*

Nous venons de voir que les limites d'utilisation d'un niveau sont relativement faibles.

Dans l'exemple précédent, le niveau ayant 10 divisions, la pente maximum qui peut être contrôlée est de 0,04 × 10 = 0,4 par mètre. Avant de procéder au contrôle, il faut donc mettre le plan à peu près horizontal, ce qui n'est pas toujours possible. Par contre, avec un niveau monté sur bras articulé, il n'est pas nécessaire de faire le réglage avec autant de soin. En outre, le réglage du bras permet de faire travailler le niveau au voisinage de la graduation zéro, position pour laquelle la précision est maximum (voir *fig.* 9).

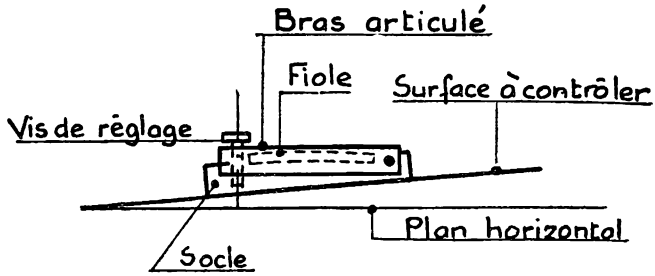


Fig. 9. — Niveau monté sur bras articulé.

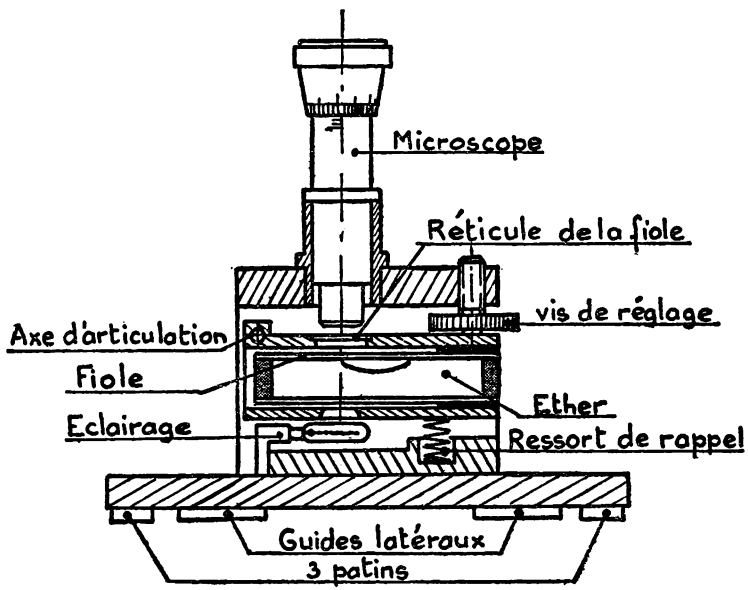


Fig. 10. — Niveau à lecteur optique.

Le niveau à lecteur optique est un niveau à fiole montée sur un support articulé. La lecture des divisions se fait à travers un réticule, gradué au moyen d'un microscope dont le grossissement est 25. L'éclairage du tube se fait par-dessous (*fig.* 10).

L'amplification du niveau étant d'environ 300, l'amplification totale est de $300 \times 25 = 7\,500$. On peut, avec ce niveau, faire d'excellentes lectures à 1 μ près.

4° Réalisation du contrôle.

a) *Mode opératoire.*

Au crayon, on dessine un quadrillage, le côté des carrés étant égal à la longueur entre patins ou cales supportant le niveau. La pièce qui comporte la surface à contrôler étant montée sur trois vérins, on amène cette surface en position sensiblement horizontale.

On se fixe ensuite un point de départ A, auquel on affecte la cote zéro (*fig.* 11). A partir de ce point et de proche en proche, on mesure les cotes des différentes intersections du quadrillage. On les inscrit sur un dessin représentant la figure à l'échelle. Il ne reste plus qu'à tracer les lignes de niveau.

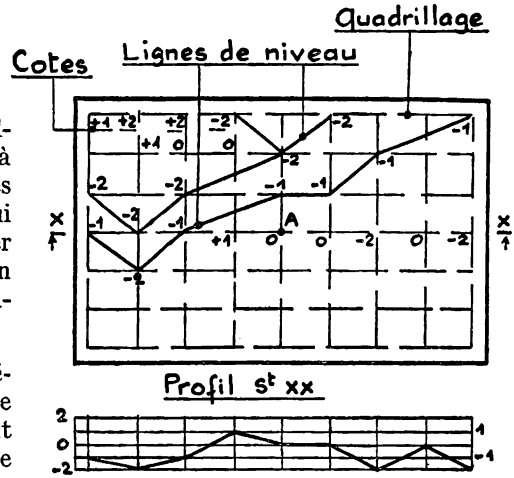


Fig. 11. — Quadrillage de contrôle à effectuer sur la pièce à vérifier.

Si l'on souhaite avoir plus de points, on réalisera un quadrillage à mailles plus serrées, à l'intérieur du quadrillage de départ.

b) *Incertitudes des mesures faites au niveau.*

La méthode de contrôle exposée dans le paragraphe précédent présente l'inconvénient de cumuler les erreurs, puisque la cote affectée à un point est directement fonction de celle trouvée pour le point précédent.

Le niveau, en raison même de sa constitution, donne des résultats qui peuvent ne pas être rigoureusement exacts :

— La température modifie la longueur de la bulle, déforme la fiole et le support : il est souhaitable de faire les mesures en milieu isotherme.

— Replacé dans les mêmes conditions, un niveau peut présenter une différence de position de la bulle : hystérésis due vraisemblablement à des phénomènes d'adhérence et de viscosité ; l'incertitude de mesure correspondante est de 2 à 10 microns par mètre, selon la qualité du niveau.

Il est recommandé de repérer, par retournement, la position exacte du zéro de la graduation du niveau.

C. — Contrôle des plans basé sur le principe d'utilisation d'une règle

Nous avons vu que l'on peut utiliser une règle avec un chariot porte-comparateur coulissant. Lorsque cette règle a une grande longueur, elle risque de se déformer sous l'action de son propre poids : on est conduit à lui donner une grande rigidité et, par suite, sa masse importante la rend difficile à manœuvrer.

La rectitude d'une règle métallique étant difficile à obtenir et à conserver, on a cherché à lui substituer une règle dont la partie rectiligne est constituée par un rayon lumineux. Les appareils créés à partir de cette idée sont **la règle optique** et **la lunette d'alignement.**

1° Contrôle du plan à la règle optique.

a) *Étude fonctionnelle d'une règle optique.*

Nous limiterons cette étude à l'examen de la règle construite par les Établissements Huet : elle permet d'obtenir avec précision les cotes, considérées à partir d'un plan de référence théorique, des différents points de la surface disposés dans un même plan vertical.

Cet appareil comporte :

— **Une règle** en alliage léger, montée sur deux cales, l'une de hauteur fixe, l'autre réglable en hauteur (voir *fig.* 12).

— **Un système optique** constitué, à chaque extrémité de la règle, par un prisme et une lentille : prismes P_1 et P_2, lentilles O_1 et O_2. Ces organes occupent, par rapport à la règle, une position fixe et sont disposés à l'extérieur de la règle, comme le montre la *coupe* 1 sur la *figure* 12.

Devant la règle et dans le plan médian du prisme et des lentilles, se déplace un chariot porte-microscope. Solidaires d'un palpeur en contact avec la pièce à contrôler, sont montés deux prismes A et G ayant pour bases des triangles rectangles isocèles. Sur une face du prisme A, un trait horizontal est gravé, en X. Un dispositif d'éclairage, comprenant une lampe électrique et une lentille condensateur, est placé à l'intérieur du pied du chariot.

Suivons le trajet du pinceau lumineux passant par le trait X :

Partant de S, il se réfléchit sur la face oblique du prisme, traverse la lentille O_1 par son centre optique, se réfléchit en B et C, traverse la lentille O_2 par son centre optique, se réfléchit en D et E, puis se réfléchit à nouveau en G et pénètre dans le microscope. Le microscope et les prismes G et A sont réglés de façon que l'image de la raie X soit située sur la graduation zéro du réticule.

Examinons ce même trajet du pinceau lumineux sur le *schéma optique développé* de la *figure* 12 :

Nous retrouvons les mêmes points caractéristiques, correspondant à la position T du palpeur : S, A, X, le centre optique de O_1, B et C du prisme P_1 non dessiné, le centre optique de la lentille O_2, D et E du prisme P_2 non dessiné, le point G sur le prisme G et, enfin, l'axe de la lunette.

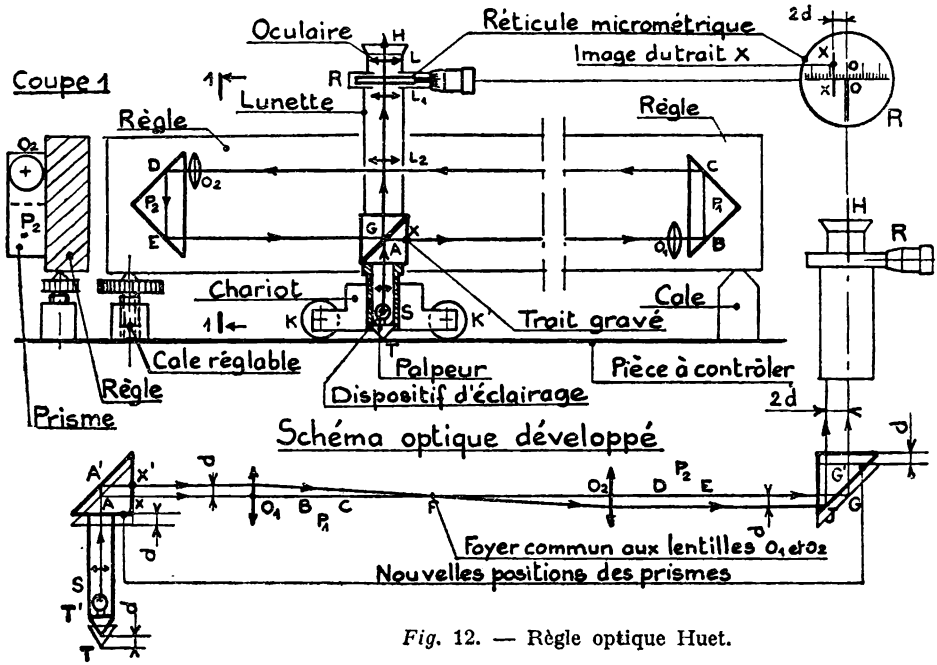


Fig. 12. — Règle optique Huet.

On remarque, sur ce dessin, que les lentilles O_1 et O_2 ont un foyer commun F.

Imaginons qu'en déplaçant le chariot, le palpeur se soulève d'une quantité *d*. Il vient en T'. Les prismes A et G, qui en sont solidaires, se soulèvent de la même quantité.

Suivons, sur le schéma optique développé, le nouveau trajet du pinceau lumineux contenant le trait venu en X' :

Le point A étant venu en A', le pinceau issu de S se réfléchit en A' et devient alors parallèle à l'axe optique des lentilles, O_1FO_2, qui n'a pas bougé. La lentille O_1 modifie la direction du pinceau qui, passant par le foyer F, redevient, après la lentille O_2, parallèle à l'axe optique O_1O_2 et distant de celui-ci d'une longueur égale à *d*, si les lentilles ont la même distance focale. Le pinceau se réfléchit ensuite sur la face du prisme en J et pénètre dans le microscope à une distance 2 *d* de son axe optique.

L'image du trait X est donc vue, sur le réticule, à une distance 2 d de la graduation zéro.

Les divisions portées sur le réticule représentent $\frac{2}{100}$ de mm lorsque le grossissement du microscope est de 50. On peut donc lire la longueur 2 d à $\frac{2}{100}$ de mm près et, par suite, avoir d à $\frac{1}{100}$ de mm près.

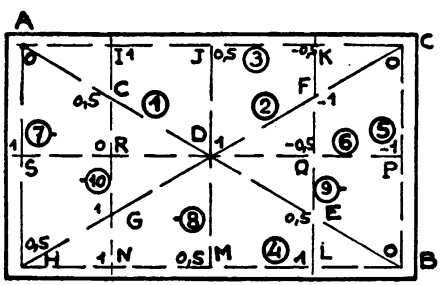
D'autre part, si l'on utilise le dispositif micrométrique pour ramener l'image du trait X entre les deux traits de zéro du réticule, on peut exprimer la valeur de d en microns.

b) *Réalisation du contrôle.*

On définit le plan de référence par trois points A, B, C, aussi éloignés que possible les uns des autres ; on leur attribue la cote zéro (*fig.* 13). C'est par rapport à ce plan que l'on va établir les cotes des différents points.

— On place la règle sur des cales disposées **en A et B** et on règle la cale de hauteur variable pour que le palpeur indique zéro en A et B. On relève les cotes des points C, D, E.

— On place la règle suivant **la diagonale 2** : la cale fixe est en C et la lecture de la cote C est évidemment *zéro* ; la cale réglable est en H et l'on modifie sa hauteur jusqu'à ce que la lecture, sur le microscope placé en D, donne la valeur trouvée précédemment, + 1 ; l'axe optique de la règle se retrouve donc dans le plan de référence défini par les trois points A, B, C.



Pour trouver les cotes des autres points, on place la règle successivement en :

position 3, réglage effectué sur A et C ;
position 4, réglage effectué sur B et H ;
position 5, réglage effectué sur C et B ;
position 6, réglage effectué sur P et D.

Fig. 13. — Réalisation du contrôle au moyen de la règle optique.

On contrôle les résultats obtenus en plaçant successivement la règle dans les positions 7, 8, 9, 10.

2° Contrôle du plan en utilisant la lunette d'alignement.

a) *Étude fonctionnelle de la lunette d'alignement.*

La lunette d'alignement est un appareil qui permet de s'assurer de **la rectitude** d'un axe ou d'une glissière ; elle peut être également utilisée pour **mesurer les défauts** de planéité des surfaces planes longues et étroites.

Il existe plusieurs types de lunettes. Leur principe est sensiblement le même.

L'appareil comprend une lunette qui est mise en position fixe et une mire qui est mobile. On examine, sur le réticule de la lunette, l'image de traits croisés dessinés sur la mire ou réfléchis par la mire. Pour fixer les idées, nous ne décrirons que la lunette d'alignement permettant d'appliquer, pour les mesures des défauts de rectitude, le principe d'**autocollimation** (*fig.* 14).

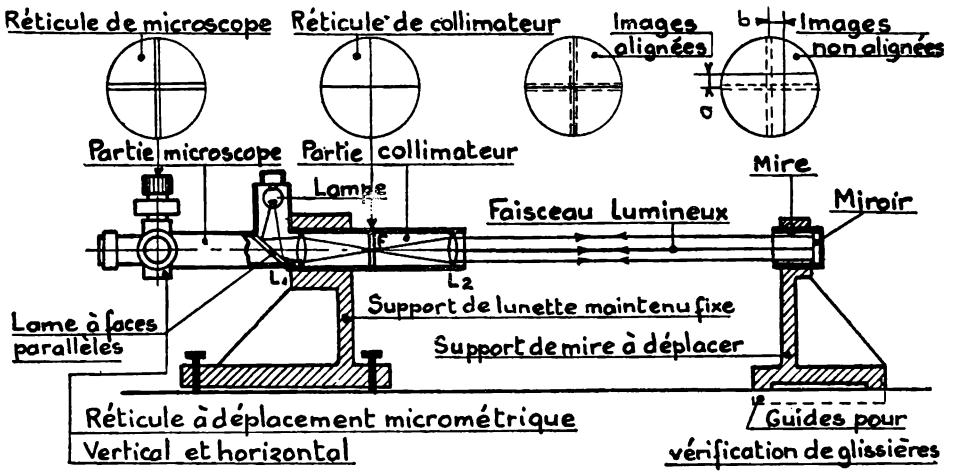


Fig. 14. — Lunette d'alignement avec dispositif d'autocollimation.

La lunette comprend :

1° **Un microscope** possédant un réticule, à doubles traits croisés, qui est porté par deux chariots rectangulaires.

2° **Un collimateur** comportant :

— *une source lumineuse* ;

— *une lame transparente,* permettant aux rayons lumineux de se réfléchir sur sa surface plane et, également, de la traverser ;

— *un réticule,* comportant deux traits croisés ;

— *deux lentilles,* destinées à produire un faisceau de rayons lumineux parallèles.

La mire comprend :

— **Un support** dont la semelle comporte trois patins, distants de la longueur *l,* et un guide perpendiculaire au plan des patins.

— **Un miroir** dont le plan est normal à l'intersection des plans du guide et des patins.

b) ***Réalisation du contrôle.***

La lunette est mise à poste fixe ; elle est réglée pour que l'image des traits croisés du réticule du collimateur vienne se placer exactement entre les doubles traits croisés du réticule du microscope, quand la mire occupe une position quelconque de la glissière à contrôler.

Supposons que l'on vérifie une glissière comportant une face verticale et une face horizontale.

La lunette ayant été réglée comme il vient d'être indiqué, on avance la mire d'une quantité l, égale à la longueur de sa semelle, et on examine la position de l'image des traits tracés sur le réticule du collimateur. On peut trouver deux écarts a et b (vue correspondant aux images non alignées, *fig.* 14). Cela montre qu'il y a une erreur d'alignement de la face verticale de la glissière, indiquée par b, et une erreur de la face horizontale, indiquée par a. Les valeurs de a et de b peuvent être connues à $\pm$ 1 ou 2 microns, grâce au dispositif micrométrique.

Connaissant les caractéristiques des éléments optiques de la lunette et l'éloignement de la mire de la lunette, il est possible de déterminer la valeur des erreurs d'alignement des deux faces de la glissière.

La lunette d'alignement et sa mire, enlevées de leurs supports conçus pour le contrôle des glissières ou des surfaces planes, peuvent être utilisées, par exemple, à la vérification de l'alignement d'une broche d'aléseuse et du support de barre : la mire est alors montée sur la broche, et la lunette dans l'alésage du support de barre, ou inversement lorsque la lunette a son oculaire disposé perpendiculairement à l'axe du collimateur.

◇

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 3

ETUDE DES PRINCIPAUX MÉTAUX UTILISÉS EN CONSTRUCTION

Propriétés générales des matériaux utilisés en construction mécanique ou électrique 7
Principales propriétés des matériaux 7
Propriétés correspondant aux différents modes d'élaboration des pièces 8
Propriétés qui justifient l'emploi des différents matériaux dans les constructions 10

Essais des matériaux 15
Etude des principaux essais 16
Essais de traction 17
Essais au choc 21
Essais de fatigue 24
Essais de dureté 30

Métallurgie du fer et de ses alliages 41
Classification des métaux ferreux 41
Métallurgie de la fonte 42
Elaboration de l'acier 50

Propriétés des principaux alliages ferreux 57
Classification 57
Les fontes 58
Les aciers 61

Forme marchande des aciers 73
Produits laminés 73
Produits étirés 82
Produits tréfilés : fils 84

Les métaux et alliages non ferreux 85
Désignation normalisée des métaux et des alliages non ferreux 87
L'aluminium et ses alliages 88
Le magnésium et ses alliages 96
Le cuivre et ses alliages 98
Alliages spéciaux utilisés dans la confection des outils 105
Métaux divers, zinc, plomb, étain, et leurs alliages 108

Les traitements thermiques 113
Les alliages fer-carbone 113
Etude expérimentale élémentaire 113
Etude métallurgique de l'alliage fer-carbone 116

Etude des traitements thermiques 141
Les principaux traitements thermiques 141
Mesure des températures élevées 143
Chauffage des pièces : les fours 149
La trempe 155
Le revenu 169
Le recuit 176
Le vieillissement des aciers et des fontes 183
La cémentation 184

La nitruration ... 198
La sulfinisation ... 203
La carbonitruration ... 204
L'outil de coupe ... 206
Conditions de travail des outils ... 206
La géométrie des outils ... 212
Étude de l'outil « en main » ... 218
Relations entre les angles caractéristiques de la partie active des outils ... 240
Fabrication des outils ... 244
Affûtage ... 247
La vitesse de coupe ... 255
Vitesses de coupe des outils en acier rapide ... 257
Calcul des vitesses de coupe des outils en carbure ... 277
Actions mutuelles résultant de la coupe du métal ... 287
Valeur des composantes des actions mutuelles dues à la coupe ... 287
Efforts correspondant aux principaux modes d'usinage ... 291
Protection des surfaces métalliques contre la corrosion ... 295
Préparation des pièces à protéger contre la corrosion ... 298
Protection des pièces ... 303
Corrosion des pièces recouvertes d'un dépôt métallique ... 318

MÉTROLOGIE

Métrologie dimensionnelle ... 323
Système international à limites ... 323
Etude des ajustements ... 328
Appariement des pièces ... 335
Etude de la cotation des pièces ... 336
Incertitudes et erreurs des mesures dimensionnelles ... 355
Qualités d'un appareil de mesure ... 356
Etude de l'écrasement des contacts résultant des déformations des pièces ... 361
Influence de la température sur la précision des mesures dimensionnelles ... 364
Métrologie pneumatique ... 375
Principe ... 375
Le micromètre pneumatique Solex ... 375
Comparateur à amplificateur pneumatique Compac ... 385
Appareil pneumatique différentiel Etamic ... 387
Métrologie optique ... 393
Rappel des notions d'optique géométrique ... 393
Application de l'optique à la métrologie ... 403
La loupe ... 404
Les microscopes ... 406
Les appareils de projection ... 418
Métrologie électrique ... 423
Les réalisations pratiques ... 425
Les comparateurs ... 425
Appareils de triage pour travaux de série ... 429
Métrologie du plan ... 437
Contrôle des surfaces planes ... 437
Vérification du plan au niveau ... 439
Contrôle des plans bas sur le principe d'utilisation d'une règle ... 445

FOUCHER

Collection « LA TECHNIQUE DU MÉTIER »

Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens.

Tome I	A. CAMPA
Tome II	—
Tome III. — Procédés d'usinage	CAMPA & ROLLET

Technologie professionnelle générale pour l'automobile.

(3 volumes)	M. DESBOIS, TOUACHE, TORRI, TOURANCHEAU, ARMAO & VIEUX
Technique de la réparation (3 volumes)	DESBOIS, MARIE & MARTIN
Technologie professionnelle pratique	
pour le tourneur (3 volumes)	L. GOUPIL
pour le chaudronnier (3 volumes)	C. LOBJOIS
pour le fraiseur	A. ARNAUD & A. ROLLET
Technologie de construction mécanique (4 volumes)	LENORMAND & MIGNÉE

Collection « LA TECHNIQUE GRAPHIQUE »

Schémas d'électricité	P. HEINY
Mémento de dessin industriel	LENORMAND & TINEL

Conventions de représentation. Cotation.
Documentation dimensionnelle.
Problèmes graphiques.

Collection « AUTOMATISME »

L'automatique par les problèmes	CAMPA, CHAPPERT, THIBERVILLE & COJEAN
Automatisation des machines-outils	P. FORT

ÉLECTRICITÉ

Électricité (2 volumes)	LEFRAND, AUCLERC POINSARD
Technologie d'électricité (7 volumes)	P. HEINY et collaborateurs

le Livre au service du Métier

Les Éditions FOUCHER
128, rue de Rivoli
PARIS-1er
N° 4874-183

Imprimé en France

Imp. BUSSIÈRE
24, rue de Juranville
SAINT-AMAND (Cher)
2985-I-1983

ISBN 2-216-00199-6
C

FF 58,25